Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wie Europa im Irak sein Gedächtnis verliert

War alles halb so schlimm? Wurde das Nationalmuseum in Bagdad eigentlich fast gar nicht ausgeraubt? Ist das älteste Kulturerbe des Abendlandes doch nicht zerstört, doch nicht in alle Winde verstreut? Nachdem sich die Welt schon auf die Totalvernichtung von Zeugnissen der archaischen Hochkulturen Mesopotamiens eingestellt hatte, landete der Chef der US-Zivilverwaltung im Irak, Paul Bremer, einen PR-Coup: Einer staunenden Weltöffentlichkeit, der noch die Livebilder des verwüsteten Nationalmuseums in Bagdad im Gedächtnis hafteten, präsentierte er den verschollen geglaubten »Schatz der Königinnen von Nimrud«. Anfang Juli durfte ihn die Weltpresse für Stunden bewundern – den bedeutendsten archäologischen Fund Iraks im letzten Jahrhundert, mit Juwelen und Goldkunst aus der Zeit um 900 v. Chr. Der erst 1988 entdeckte Schatz wurde unversehrt aus Tresorräumen hervorgeholt (siehe auch »Tod in Mesopotamien« ab S. 68 und das Spezialheft »Moderne Archäologie«).

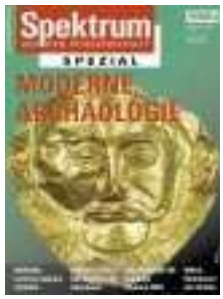
LINKS: BILDARCHIV PREUSSISCHER KULTURBESITZ BERLIN; RECHTS: ANONYM

Die 5000 Jahre alte Warka-Vase vor und nach ihrer Zerstörung im Irakkrieg

Von ursprünglich 170 000 verloren geglaubten Objekten fehlen laut einem Untersuchungsbericht vom Juli tatsächlich nur rund vierzig bedeutende sowie einige tausend weitere Artefakte, darunter 4800 Rollsiegel. Andere Stücke wurden zerstört oder beschädigt zurückgebracht – wie etwa die kostbare Warka-Vase (siehe Bild). Doch zeitgleich mit dem Glitzern des Goldschatzes im Blitzlichtgewitter der Propaganda-Inszenierung wütet der Vandalismus weiter. Die Raubgräber schlagen nun verstärkt außerhalb Bagdads zu. Vor allem im Süden des Landes werden zahllose der 15 000 bekannten archäologischen Stätten systematisch geplündert, Steinreliefs herausgebrochen, Tontafeln und Terrakotten weggeschafft, Beschädigtes weggeworfen. Gut ausgerüstete und bis an die Zähne bewaffnete Plünderer leuchten die Hügel aus, wühlen im Boden herum, verwandeln Grabungsorte in Mondlandschaften und vernichten damit jeden Fundzusammenhang. Betroffen sind etwa Umma, Nippur oder Isin – während es durchaus vorkommt, dass eine Unesco-Delegation ohnmächtig dabei zusehen muss. Denn nur wenige Stätten werden inzwischen militärisch geschützt.

Der Ausverkauf des Weltkulturerbes hat längst begonnen, Kunsthändler in aller Welt können es kaum erwarten mitzumischen. Viele Objekte werden außer Landes gebracht, womöglich auch ins Genfer Zollfreilager, wie Experten vermuten. Da in der Schweiz Diebstahl von Kulturgütern bereits nach fünf Jahren verjährt, kann die Ware dann legal in den Kunsthandel gebracht werden.

Der Irak ist nur ein – wenngleich besonders krasses – Beispiel für den Raub archäologischer Zeugnisse in Ländern, die große wirtschaftliche Not leiden. Leider muss die internationale Gemeinschaft der Archäologen mehr als bisher den Krieg in ihr Kalkül einbeziehen – wie anderswo in lokalem Rahmen die drohende Zerstörung von Denkmälern durch Bauarbeiten. Darum sind in Krisenregionen Notgrabungen – in Frankreich als »präventive Archäologie« bekannt – das Gebot der Stunde.



Spektrum-Spezial 2/2003

INHALT

FORSCHUNG AKTUELL

10 **Nachrichten von den ersten Sternen**
Entdeckung schwerer Elemente im jungen All beweist frühe Sternsynthese

14 **Der Transistor der Zelle**
Strukturanalyse des Kaliumkanals zeigt, wie er sich spannungsabhängig öffnet

16 **Strafe muss nicht sein**
Drohen mit Sanktionen senkt die Bereitschaft zu selbstlosem Handeln

19 **Bild des Monats**
Himmlisches Feuerwerk

SPEKTROGRAMM

36 Quintetts aus Quarks · Jungbrunnen im Froschei · Felsmalereien der Aborigines · Monster von Eislingen · Uralter Planet · Beute erlegt Jäger

THEMEN

20 **25 Jahre Spektrum der Wissenschaft**
Teil IX: Der Siegeszug der Algorithmen
Hochleistungsrechnen, Nachrichtenverschlüsselung und der Quantencomputer

26 **TITELTHEMA: Über das Standardmodell hinaus**
Teilchenphysiker suchen neue Urbausteine

38 **Schwarze Löcher und Sternentstehung**
Was zwei der energiereichsten Phänomene im All miteinander zu tun haben

46 **Wettstreit um die ersten Hominiden**
Welche Fossilien stammen von unseren Ahnen?

58 **Neue Therapie für Teilblinde**
Sehtraining erweitert Blickfeld

68 **Totenkult im Zweistromland**
In der Schattenstadt der Unterwelt wartete kein Paradies

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

78 **Der große kleine Unterschied**
Trotz ihrer hohen Motivation und Qualifikation sind Physikerinnen in Führungspositionen unterrepräsentiert

Titelbild: Mit neuen Teilchenschleudern wollen Physiker die Grenzen des Standardmodells sprengen. Beim Zusammenprall von Quark und Antiquark (rot und blau) könnten unter anderem supersymmetrische Teilchen (violett) entstehen.

Bild: Bryan Christie Design

SEITE 20

SERIE »25 JAHRE SPEKTRUM« (IX)

Ein Vierteljahrhundert Informatik

Es brodelt wie in keiner anderen Wissenschaft: Der Computer erobert sich ein Anwendungsfeld nach dem anderen, und das Ende seiner Möglichkeiten liegt selbst für die Theoretiker noch im Dunkeln.

SEITE 38

ASTRONOMIE

Galaxien im Ausnahmezustand

Warum treten massereiche Schwarze Löcher und Gebiete mit besonders hoher Geburtenrate von Sternen gemeinsam auf? Astronomen erkunden, was beide Phänomene verbindet.

SEITE 46

PALÄOANTHROPOLOGIE

Wer waren die ersten Hominiden?

Die Forschung war den Anfängen der menschlichen Evolution noch nie so nah. Doch Anthropologen streiten, ob der neu entdeckte, 7 Millionen Jahre alte Schädel aus dem Tschad vom Urahn der Hominiden stammt.

SEITE 26

TITELTHEMA: TEILCHENPHYSIK

Neue Physik jenseits des Standardmodells

Das Standardmodell der Teilchenphysik steht an einem historischen Wendepunkt. Noch ist sein Erfolg konkurrenzlos – aber zugleich zeichnet sich bereits seine Ablösung ab.

SEITE 58

GEHIRNFORSCHUNG

Sehtraining bei Teilblindheit

Manchen Hirngeschädigten mit eingeschränktem Gesichtsfeld können spezielle Übungen helfen, von ihrer Umwelt wieder einen größeren Ausschnitt zu sehen.

SEITE 68

VORDERER ORIENT

Tod in Mesopotamien

Der Generationenvertrag in Babylon oder Ninive lautete: Die Angehörigen sorgen durch Grabpflege und Opfergaben für ein erträgliches Leben im Jenseits, der Verstorbene schützt seine Nachkommen.

80 **Vermeintlicher Schutzschild**
Eine neue Studie zerstört die Träume von einer nationalen Raketenabwehr

REZENSIONEN

84 **Meilensteine der Wissenschaft** von Peter Tallack (Hg.)

Einsteins Schleier von Anton Zeilinger

Die verlorene Kunst des Heilens von Bernard Lown

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

92 **Die Evolution der Computerwürmer**

KOMMENTARE

13 **Nachgehakt**
Die Kepler-Vermutung – Ein erschöpfender Beweis

83 **Auf der Suche nach der Wahrheit**
PR und Wissenschaftsjournalismus

WISSENSCHAFT IM ...

56 **Alltag:** Der Autofokus

67 **Rückblick:** Ein Mensch aus tausend Teilen, Schnee auf dem Mond, Elektrisches Pianophon, u. a.

76 **Unternehmen:** Empfindlicher Biosensor

88 **Internet:** Von der Pyramide zum Stahlwerk

WEITERE RUBRIKEN

5 Editorial · 8 Leserbriefe/Impressum · 90 Preisrätsel · 96 Stellenmarkt · 98 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Ernährung und Krebs

Rund 35 Prozent aller Krebserkrankungen könnten durch richtige Ernährung vermieden werden. Aber wie sieht diese aus?

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Biometrie (Teil I)

Juli 2003

Die ec-PIN ist nicht im Chip der deutschen Bankkarten gespeichert. Infolgedessen kann man diese PIN auch nicht auslesen. Zusätzlich sind sämtliche personen- oder kontospezifischen Daten im Chip gegen unberechtigtes Auslesen geschützt.

Die Behauptung, Biometrie bringe »mehr Sicherheit für den Verbraucher«, ist irreführend, weil sämtliche biometrischen Erkennungsmethoden einen gewissen Grad der statistischen Unsicherheit haben, wohingegen die Prüfung der PIN genau erfolgt. Nur diese Exaktheit bietet den erforderlichen Schutz für die Absicherung von geldwerten Transaktionen.

Dr. Olaf Jacobsen, Berlin

Entscheidung unter Unsicherheit – die Ergebnisse

Forschung aktuell, Mai 2003

Die Autoren gehen von der falschen Annahme aus, mein Vermögen sei für mich der einzige Wert auf dieser Erde. Es fördert das Vertrauen, wenn ich auf eigene Sicherheit verzichte, um dafür einem kooperierenden Partner 80 Euro zu ermöglichen. Und Vertrauen ist unter Menschen kein Nonvaleur.

Dies zeigt auch das beschriebene Laborexperiment, bei dem allein auf Grund von Misstrauen viel Geld verloren geht. Kooperieren ist kein Denkfehler, sondern die Voraussetzung jeder Zivilisation. Schade, dass Ökonomieprofessoren ihren Studenten mit solcher Argumentation die Menschlichkeit austreiben.

Philipp Wehrli, Zürich

Menschwerdung durch Kraftnahrung

Mai 2003

Das allgemeine Rätselraten der Anthropologen über den Ursprung des aufrechten Gangs kann ich nicht nachvollziehen. Ich bin überzeugt, es waren Steine und Knüppel, die unsere Vorfahren noch auf allen vieren benutzt haben, um Fressfeinde zu vertreiben und Nahrung zu gewinnen, so wie es Schimpansen heute noch tun. Um sich ins offene Grasland hinauswagen zu können, mussten sie lernen, gut zu werfen und zu schlagen, was einen festen Stand und präzisen Griff erforderte. Um geeignete Waffen mit sich herumzutragen – das war nötig, da man diese nicht überall fand –, brauchten sie freie Hände.

JOHN GURCHE

▲ Vor 3,5 Millionen Jahren streifte *Australopithecus afarensis* durch lichte Wälder, seine Hauptnahrung bestand aus pflanzlicher Kost.

Wie Leonhard feststellt, ist der aufrechte Gang im Fußgängertempo energetisch sehr günstig, dies kam seiner Entwicklung natürlich entgegen, aber seine Nachteile, vor allem die geringe Höchstgeschwindigkeit, konnten nur durch Waffen kompensiert werden.

Der aufrechte Gang war wohl schon vor 4 Millionen Jahren etabliert, und es hat dann rund 2 Millionen Jahre gedauert, bis Werkzeugauswahl und Einsatz so weit entwickelt waren, dass Wurf- und Schlagwaffen nicht nur zum Verscheuchen von Tieren, sondern auch zur Jagd eingesetzt werden konnten. So wurden plötzlich viele gegenüber der neuen Technik arglose Tiere zur relativen Beute der Hominiden. Sie hatten nun reichlich zu fressen und konnten sich ein riesiges Gehirn leisten. Kein Wunder, dass sie sich binnen kürzester Zeit über die gesamte zugängliche Welt ausbreiteten.

Sicherlich war auch die Entdeckung des Feuers mitentscheidend für diese Entwicklung. Es machte Nahrung ja nicht nur verdaulicher, sondern auch frei von Krankheitserregern.

Joseph Bülhoff, Werne

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg, Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Andreas Merkert (stv. Hersteller), Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-711, Fax (06221) 91 26-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-600, Fax (06221) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (02244) 4303, Fax (02244) 6383, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0211) 9083357, Fax (0211) 9083358, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (06221) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (06221) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Ulf Borgeest, Dr. Frank Scholz, Dr. Michael Springer, Klaus Volkert.
Leser- und Bestellservice: Tel. (06221) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (06201) 60 61 50, Fax (06201) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0211) 887-23 79, Fax (0211) 887-23 99; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-24 83, Fax (0211) 887-23 70
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (030) 61 68 61 50, Fax (030) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (040) 30 18 31 94, Fax (040) 33 90 90; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 301 35-20 60, Fax (0211) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (069) 24 24-45 34, Fax (069) 24 24-45 55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475-40, Fax (0711) 22 475-49; München: Reinold Kassel, Bernd Schmetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (089) 54 59 07-12, Fax (089) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-23 87, Fax (0211) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 vom 01.01.2003.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen
© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69038 Heidelberg.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2003 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

Fliegende Anti-Malaria-Waffen

April 2003

Frau Reinberger schreibt, die Malaria sei eine Tropenkrankheit, weil die Überträgerin, die Anopheles-Mücke, in unseren Breiten nicht vorkomme. Von den in Europa an Malaria Erkrankten seien auch solche betroffen, die sich »durch den Stich einer eingeflogenen Anopheles infizieren, ohne je in einem tropischen Land gewesen zu sein«. Daran ist nur richtig, dass die Malaria im Allgemeinen in warmen Ländern auftritt, aber nicht, weil Anopheles-Mücken ausschließlich dort leben, sondern weil die geschlechtliche Vermehrung der Malariaerreger (Plasmodien), die in der Mücke abläuft, temperaturabhängig ist und umso länger dauert, je niedriger die Außentemperatur ist. Der Entwicklungszyklus der Plasmodien kann nur geschlossen werden, wenn eine Mücke deren geschlechtlich differenzierte Formen mit dem Blut eines Malariakranken aufnimmt und während ihres Lebens Gelegenheit hat, einen neuen menschlichen Wirt zu stechen, nachdem die Sporozoiten die Speicheldrüse erreicht haben. In unseren Breiten wird der Entwicklungszyklus kaum ablaufen können, weil diese Phase zu lange dauert und es zudem an Malariakranken mangelt.

Dr. med. habil. Rüdiger Fischer, Magdeburg

Erratum

Der Widerspenstigen Zähmung

Juli 2003

Im untersten Bild auf S. 26 wurde die Beschriftung vertauscht. Links ist das Hydroxyl-Radikal, rechts Kohlenmonoxid abgebildet.

Die Redaktion

Die Alltagsdroge Koffein

Juni 2003

Ich habe diesen informativen und gut lesbaren Beitrag mit Gewinn und Vergnügen gelesen. Das Bild auf Seite 66 [hier nochmals gezeigt] zeigt allerdings die Zubereitung von Schokolade und damit wohl auch deren Genuss. Dieses Luxus-Getränk wurde gequirlt, in einer Kanne mit hölzernem Griff. Kaffee wurde gebrannt und aufgegossen oder gekocht. Im 18. Jahrhundert galt Kaffee übrigens in Adelskreisen als eher gewöhnliche Droge. So kann man es z. B. in Casanovas Lebenserinnerungen lesen und in meinem Buch »Coffi, Schokelati und Potasie«.

Dr. Petra Seling-Biehusen, Vorwerk

AKG BERLIN / JAN VAN GREVENBROECK

Während der stehende Herr schon Kaffee trinkt, wartet der sitzende Gast auf seinen Kakao, der gerade zubereitet wird.

Richtiges Sehen – eine optische Täuschung?

Mai 2003

Das Auge ist eben nur »Werkzeug«, Schlüsse oder Trugschlüsse zieht das Gehirn. Aus objektiv physiologischer Sicht werden im Gehirn schwache elektrische Impulse verarbeitet, aber wie entsteht aus diesen unser subjektiver Eindruck z. B. einer »täuschenden Schachtel« (Bild S. 77)? Das ist naturwissenschaftlich objektiv nicht zu erklären, Philosophen und Hirnforscher sprechen bei diesem Phänomen von »Qualia«. Physikalisch gesehen weisen Deckel und Boden den gleichen Grauwert auf, wir aber erkennen den Deckel dunkler als den Boden. Unsere Erkenntnis wird also durch Qualia gesteuert, nicht durch die Naturwissenschaft.

Prof. Peter R. Gerke, Gräfelfing

Die Evolution der Hautfarben

Juni 2003

Die Autoren versuchen in ihrem Artikel auch die Ursache für die Nacktheit des Menschen zu erklären. Ich finde ihre Begründung aber wenig überzeugend. In der heißen Savanne, wo der Urmensch entstand, habe die Behaarung zurückgehen müssen, damit der Schweiß leichter verdunsten konnte. Der Lichtschutz durch das Fell sei von Hautpigmenten übernommen worden. Warum hat dann aber keine andere Art, vielleicht abgesehen vom weitgehend haarlosen Elefanten, ähnlich reagiert?

Unter Temperaturphysiologen wird dagegen diskutiert, dass beim aufrechten Gang der Rücken nicht mehr so sehr den in den Tropen steil einfallenden Sonnenstrahlen ausgesetzt ist, und ein Fell als Lichtschutz der Haut nur auf dem Schädel überlebensnotwendig bleibt. Die bei Männern häufige Glatze tritt ja meist erst nach der Fortpflanzungsphase auf, sodass in dieser Hinsicht kein großer Selektionsdruck bestand.

Ein ganz anderer Gesichtspunkt wurde bereits von Darwin diskutiert. Im Haarverlust sah er keinen Überlebensvorteil, der sich durch Selektion durchgesetzt haben könnte; er nahm an, dass zufällig entstandene erbliche Haarlosigkeit sexuell attraktiv war und sich dadurch verbreitet hat.

Die Anlage für starke Körperbehaarung gibt es offensichtlich noch: Menschen mit Fell wurden früher an Fürstenhöfen und auf Jahrmärkten gezeigt, gelegentlich findet man auch Darstellungen in hautärztlichen Zeitschriften.

Prof. Dieter Böning, Berlin

ASTRONOMIE

Nachrichten von den ersten Sternen

Wie mehrere neue Beobachtungen mit verschiedenen Teleskopen auf der Erde und im Weltraum zeigen, gab es schon im jungen Universum Galaxien und Quasare mit schweren Elementen. Demnach entstanden die ersten Sterne früher als bisher vermutet.

Von Georg Wolschin

Während der ersten drei Minuten nach dem Urknall bildeten sich nur Wasserstoff, Helium und ein wenig Lithium. Schwerere Elemente – von den Astronomen pauschal »Metalle« genannt – kamen erst viel später hinzu: Sie wurden im Verlauf der so genannten Nukleosynthese durch Kernreaktionen im Inneren massereicher Sterne erzeugt und, wenn diese in einer gewaltigen Supernova-Explosion an ihrem Lebensende verglühten, im All verteilt. Zum genauen Verständnis der Frühgeschichte des Universums ist es sehr wichtig zu wissen, wann und wie die Elementsynthese in Sternen sowie die Anreicherung der Elemente in den Galaxien begann.

Erst jüngst lieferte der Satellit Wmap über Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung, die gleichsam ein Lichtecho des Urknalls ist, indirekte Hinweise darauf, dass sich schon rund 180 Millionen Jahre nach dem Ursprung des Kosmos Staub und Gase zu den ersten stellaren Objekten zusammenballten (Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 8). Nun stützen gleich drei Serien von neuen Beobachtungen diesen überraschenden Befund. Zwei davon tun das, indem sie in fernen Himmelsregionen, deren Licht aus der Frühzeit des Alls stammt, bereits schwere Elemente nachweisen, wie sie nur in Sternen entstanden sein können.

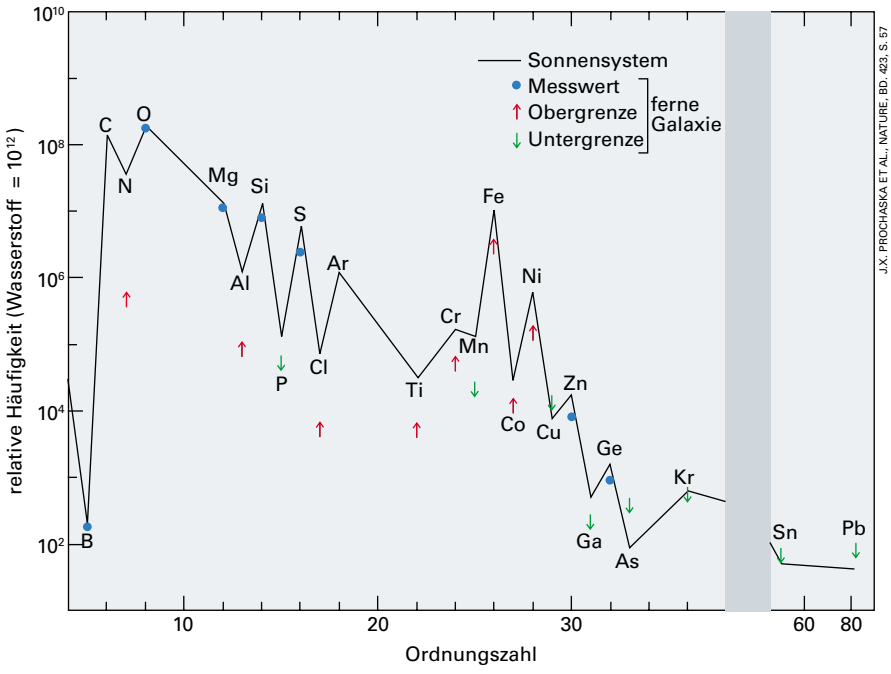
Metalle aus der Frühzeit des Kosmos

Dieser Nachweis ist extrem schwierig und erfordert hochempfindliche Apparaturen. Er gelang denn auch nur mit den leistungsfähigsten Instrumenten, die den Astronomen derzeit zur Verfügung stehen: den Keck-Teleskopen auf Hawaii, dem VLT in Chile und dem Hubble-Weltraumteleskops. Ferner mussten günstige Bedingungen hinzukommen. So hatte die amerikanische Astronomengruppe um Jason Prochaska das Glück, einen sehr fernen und zugleich sehr hellen Quasar zu finden, dessen Licht auf dem Weg zur Erde eine ebenfalls weit entfernte und damit sehr frühe Protogalaxie durchquert. Dadurch ermöglicht er die Spektralanalyse dieses Sternsystems. Die dort vorhandenen Elemente verraten sich dabei durch charakteristische Absorptionslinien *(Nature, Bd. 423, S. 57)*.

Die Protogalaxie – vermutlich der Vorläufer einer elliptischen Galaxie – war im Jahr 2000 entdeckt worden. Sie hat eine Rotverschiebung von 2,6, was einer Entfernung von etwa 11 Milliarden Lichtjahren entspricht. Demnach sehen wir die Galaxie so, wie sie vor 11 Milliarden Jahren war. Die Rotverschiebung des dahinter liegenden Quasars beträgt 2,7.

Ein erstes Spektrum mit moderater Auflösung nahmen die Astronomen mit dem Teleskop Keck II im Rahmen eines groß angelegten Programms zur Untersuchung der chemischen Entwicklung des Universums auf. Als sie dabei ungewöhnlich starke Metall-Absorptionslinien fanden, ließen sie eine detaillierte Analyse mit dem Hires-Spektrografen von Keck I folgen. Dabei entdeckten sie mehr als 25 schwere Elemente – von Sauerstoff bis hin zum Blei (Bild unten). Dies ist als kleine Sensation zu werten: Bei bisherigen Beobachtungen von Galaxien im frühen Universum konnten nur wenige Metalle nachgewiesen werden, die zudem alle leichter als Eisen waren.

Vor 11 Milliarden Jahren – der Zeit, aus der die untersuchte Protogalaxie



In einer 11 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie konnten jetzt 25 schwere Elemente nachgewiesen werden. Sie verraten sich durch Absorptionslinien im Licht eines Quasars, das auf dem Weg zur Erde die Galaxie durchquert. Die relative Häufigkeit der Elemente stimmt erstaunlich gut mit der im Sonnensystem überein. Vor 11 Milliarden Jahren – rund 2,7 Milliarden Jahre nach dem Urknall – verlief die Bildung schwerer Atomkerne im Inneren von Sternen also schon ganz ähnlich wie heute.

stammt – war das Weltall zwar noch sehr jung; dennoch lag der Urknall schon etwa 2,7 Milliarden Jahre zurück. Unter diesen Umständen ist die Entdeckung schwerer Elemente nicht mehr ganz so überraschend. Zwei Dinge machen sie dennoch bemerkenswert. Erstens beweist die Anwesenheit von Metallen schwerer als Eisen, dass auch damals schon Sterne mit 15 und mehr Sonnenmassen entstanden waren, die kurze Lebensdauern von wenigen Millionen Jahren haben, bevor sie als Supernovae enden und ihren Inhalt in der Galaxie verstreuen. Nur solche Schwergewichte können nämlich die höheren Elemente erzeugen.

Mindestens genauso bedeutsam ist das zweite Faktum: Prochaska und seine Kollegen konnten auch die relative Häufigkeit der gefundenen Metalle ermitteln, und die ist, wie sich zeigte, derjenigen im Sonnensystem erstaunlich ähnlich (Bild unten). Demnach lief die Elementsynthese in jungen Galaxien bereits nach demselben Schema ab wie heute.

Noch deutlich näher an den Urknall heran als Prochaskas Gruppe kamen drei Astronomen von der Europäischen Südsternwarte Eso, dem Space Telescope Science Institute in Baltimore und der Universität von West-Michigan in Kalamazoo. Statt das Quasarlicht lediglich als Hintergrundbeleuchtung zu benutzen, um Absorptionsspektren von Sternsystemen im Vordergrund aufzunehmen, entlockten sie ihm die Informationen, die es in Form von Emissionslinien über die quasistellaren Objekte selbst liefert. Quasare sind die leuchtkräftigsten Strahlungsquellen aus der Frühzeit des Universums, und sie beziehen ihre enorme Energie nach heutigem Kenntnisstand aus dem Einfall von Materie in extrem massereiche Schwarze Löcher in den Zentren ihrer Wirtsgalaxien.

Wolfram Freudling von der Eso in München und seine beiden Kollegen nutzten das Instrument Nicmos (Near-Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) an Bord des Hubble-Weltraumteleskops, um Spektren dreier Quasare mit Rotverschiebungen zwischen 5,78 und 6,28 aufzunehmen, was etwa einer Milliarde Jahre nach dem Urknall entspricht *(Astrophysical Journal, Bd. 587, L67)*. Dabei gelang ihnen der Nachweis von Kohlenstoff und Magnesium. Außerdem war ein schwächer ausgeprägter Linienkomplex von einfach ionisiertem Eisen zu beobachten.

GERAINT LEWIS, UNIVERSITÄT SYDNEY / NRAO / AUI / NSF

Die Staubscheibe um den 12,1 Milliarden Lichtjahre entfernten Quasar PSS 2322+1944 – hier in künstlerischer Darstellung – sendet thermische Radiostrahlung von etwa 50 Kelvin warmen Staubteilchen aus. Bei einem Durchmesser von 12 000 Lichtjahren kann sie nicht vom Schwarzen Loch im Zentrum aufgeheizt werden, sondern nur durch Sternbildungsprozesse im Inneren der Scheibe.

Nach akzeptierten Theorien der Nukleosynthese sind für die Erzeugung und Verteilung der Metalle um Eisen hauptsächlich Supernovae vom Typ Ia verantwortlich. Sie gehen aus Sternen relativ niedriger Masse hervor, die eine ziemlich lange Lebensdauer haben und normalerweise unspektakulär als Weiße Zwerge enden. In diesem Falle allerdings haben sie einen nahen Begleiter, von dem sie am Schluss ihres Werdegangs so lange Materie abziehen, bis sie unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabieren. Berücksichtigt man ihre lange Lebensdauer, so müssen sie schon 100 bis 400 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden sein – in ausgezeichneter Übereinstimmung mit den Schlussfolgerungen aus den Wmap-Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Der erste Staub im All

Die dritte Gruppe von aktuellen Untersuchungen zur Sternbildung im frühen Universum benutzte Radiostrahlung anstelle von sichtbarem Licht und wies damit Moleküle oder Staubteilchen statt einzelner Atome nach. Schon vor einem Jahr fand eine internationale Astronomengruppe eine starke Kohlenmonoxid-Linie bei einem Quasar namens PSS 2322+1944. Mit einer Rotverschiebung von 4,12 ist er 12,1 Milliarden Lichtjahre entfernt und gewährt folglich Einblicke in die Zeit 1,6 Milliarden Jahre nach dem Urknall. Die Entdeckung von Kohlenmonoxid beweist, dass es damals schon Kohlenstoff und Sauerstoff gab.

Doch diese Erkenntnis war noch nicht alles. Kürzlich ließ sich die Kohlenmonoxid-Linie mit dem Very Large Array in Socorro (Neu-Mexiko) auch räumlich auflösen (*Science, Bd. 300, S. 773*). Dabei kam den Forschern der Gravitationslinsen-Effekt einer Vordergrundgalaxie in der Sichtlinie zur Erde zu Hilfe, der die Strahlung zu einem so genannten Einstein-Ring beugt und einen unerwartet detaillierten Einblick in die Gasverteilung im Quasar ermöglicht. Aus der Größe des Rings von 1,5 Bogensekunden und seiner Position relativ zum optischen Bild des Quasars lässt sich ableiten, dass sich das Gas über eine Scheibe mit etwa ▷

A. RAMBAUD / IRAM

Mit diesen sechs Teleskopen des Radio-Interferometers auf dem Plateau de Bure in den französischen Alpen gelang es, drei Kohlenmonoxid-Linien des frühesten bekannten Quasars zu entdecken. Aus der Breite und den relativen Intensitäten der Linien lässt sich auf eine Gas- und Staubwolke von einigen tausend Lichtjahren Durchmesser schließen.

12 000 Lichtjahren Durchmesser verteilt, während das zentrale schwarze Loch nur wenige Lichttage im Querschnitt misst.

Diese Scheibe ist aber nicht nur sehr ausgedehnt, sondern hat auch eine relativ hohe Temperatur von schätzungsweise 50 Kelvin (–223 Grad Celsius). Das ergaben Messungen mit der Mambo-Kamera (Max-Planck-Millimeter-Bolometer) am 30-Meter-Radioteleskop des Instituts für Radioastronomie im Millimeterbereich (Iram) auf dem Pico Veleta bei Granada in Spanien. Dabei registrierte das Gerät ungewöhnlich starke thermische Radiostrahlung, die von erwärmten Staubteilchen stammt. Für diese Erwärmung kann unmöglich das viele tausend Lichtjahre entfernte Schwarze Loch im Zentrum verantwortlich sein. Als Heizquelle kommen nur Sternbildungsprozesse in Frage, die innerhalb der Scheibe ablaufen. Sie wurden damit erstmals in einem so weit entfernten Quasar nachgewiesen.

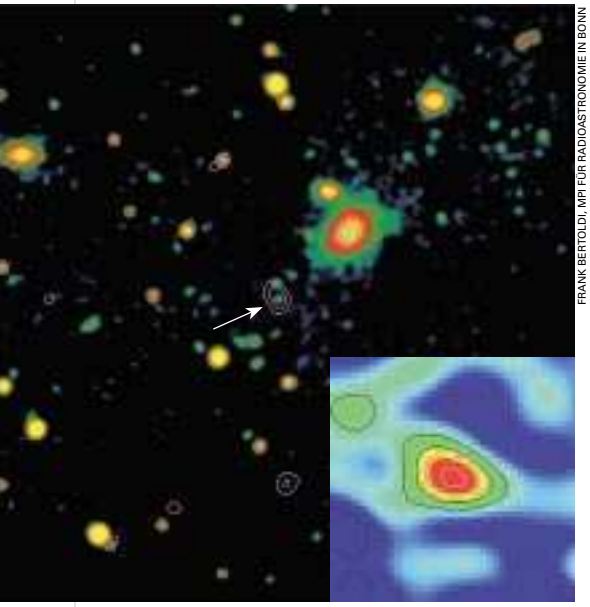
Aus der Intensität der thermischen Radiostrahlung lässt sich abschätzen, dass sich innerhalb der Staubscheibe von PSS 2322+1944 insgesamt Gasmengen von jährlich 900 Sonnenmassen zu Sternen zusammenballen. Damit beträgt die Sternbildungsrate fast das Tausendfache derjenigen in normalen Galaxien wie der Milchstraße. Unter diesen Umständen dauert es weniger als 100 Millionen Jahre, bis das stellare Inventar einer großen elliptischen Galaxie zusammenkommt – während zugleich ein massereiches Schwarzes Loch im Zentrum entsteht. Die Anreicherungsraten der schweren Elemente haben bereits ähnlich hohe Werte, wie man sie heute – 13 Milliarden Jahre danach – im interstellaren Gas benachbarter Galaxien beobachtet.

Sternbildung beim fernsten Quasar

Im Rahmen der Iram-Beobachtungen gelang es einer Gruppe um Frank Bertoldi vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn Anfang dieses Jahres schließlich auch, Staub um den fernsten bekannten Quasar zu nachzuweisen (Bild unten). Mit einer Rotverschiebung von 6,4 kündet SDSS J1148+5251 von einer Zeit, die 12,8 Milliarden Jahre zurückliegt. Bei Beobachtungen mit dem Iram-Radio-Interferometer auf dem Plateau de Bure in den französischen Alpen (Bild oben) ließen sich im April sogar gleich drei Kohlenmonoxid-Linien finden (*Nature, Bd. 424, S. 406*). Ein Gravitationslinsen-Effekt tritt hier zwar nicht auf, aber aus der Breite und den relativen Intensitäten der drei Spektrallinien ergibt sich ebenfalls eine Ausdehnung der Gas- und Staubansammlung von einigen tausend Lichtjahren.

Auch in diesem fernsten bekannten Quasar entstehen also schon in rasantem Tempo Sterne – durchschnittlich einer alle fünf Stunden. Außerdem zeigt diese Messung, dass 850 Millionen Jahre nach dem Urknall bereits die schweren Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff sowie möglicherweise Silizium in einem Quasar vorkamen. Berücksichtigt man die Zeit, die zu ihrer Bildung in den stellaren Fusionsöfen und zur anschließenden Freisetzung der schweren Elemente erforderlich war, so kommt man wieder in die Nähe des Wmap-Wertes für die Entstehung der allerersten Sterne.

Noch vor kurzem glaubten Theoretiker, dass es mindestens 700 Millionen Jahre dauerte, bis sich die ziemlich homogen verteilte Materie im jungen Kosmos zu kompakten Objekten verdichtete, in denen Fusionsprozesse in Gang kamen. Als die Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung dann Anfang des Jahres den früheren Wert nahe legte, war das eine große Überraschung. Doch die Bestätigung mit anderen experimentellen Methoden ließ nicht lange auf sich warten. Insgesamt zeigt sich eine bemerkenswerte Konsistenz der neuen Forschungsergebnisse zum frühen Universum.



FRANK BERTOLDI, MPI FÜR RADIOASTRONOMIE IN BONN

Der vor 12,8 Milliarden Lichtjahren entstandene Quasar SDSS J1148+5251 ist das fernste bekannte Objekt im Kosmos. Er erscheint auf der optischen Aufnahme als schwacher Punkt in der Bildmitte (Pfeil). Zudem emittiert er sowohl thermische Radiostrahlung, deren Stärke durch rote Konturlinien angezeigt ist, als auch Linienstrahlung von Kohlenmonoxid (eingeklinktes Teilbild). Demnach enthielt der Quasar schon etwa 850 Millionen Jahre nach dem Urknall große Mengen an Elementen wie Kohlenstoff, Sauerstoff und Silizium, die nur bei der Kernfusion im Sterninneren entstehen.

Georg Wolschin ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist; er lehrt als Privatdozent an der Universität Heidelberg.

DIE KEPLER-VERMUTUNG

Ein erschöpfender Beweis

Die Mathematik ist die Königin der Wissenschaften. Ihre strengen Gewissheiten bezieht sie aus rein formalen Schlussfolgerungen, nicht aus empirischen Beobachtungen. Die »exakten« Wissenschaften dürfen sich nur so nennen, weil sie sich bei ihren Aussagen über die Natur mathematischer Sprache bedienen. Insofern beruht der Gültigkeitsanspruch der Naturwissenschaft nicht nur auf der Prüfbarkeit durch das Experiment, sondern auch auf der unerschütterlichen Zuverlässigkeit mathematischer Sätze.

V. N. MANOHARAN

Das felsenfeste Vertrauen in die Königin der Wissenschaften gerät freilich ein wenig ins Wanken, wenn – wie jüngst gemeldet – ein rundes Dutzend Gutachter nach vier Jahre langer Prüfung eines mathematischen Beweises am Ende mitteilt, man sei von dessen Richtigkeit ziemlich überzeugt, habe nun aber einfach keine Energie mehr, dies mit hundertprozentiger Sicherheit zu attestieren *(Nature, Bd. 424, S. 12)*.

Bei dem skurrilen Fall geht es um eine Frage von trügerischer Einfachheit: Welches ist die dichteste Kugelpackung? Praktisch löst das Problem jeder Obsthändler, wenn er runde Früchte zu Pyramiden stapelt, aber schon Johannes Kepler (1571–1630) biss sich an dem Beweis, das sei die optimale Anordnung, die mathematischen Zähne aus. Der Haken ist: Es gibt zwar lokal noch dichtere Packungen, doch führen sie anderswo zu größeren Lücken.

Ende der 1980er Jahre nahm Thomas Hales – heute an der Universität Pittsburgh (Pennsylvania) – einen neuen Anlauf. Zunächst fand er heraus, dass es »nur« rund 5000 Kandidaten für die dichteste Packung gibt; um unter ihnen den Sieger zu ermitteln, musste er mehr als 100 000 Ungleichungen ausrechnen. Das beschäftigte ihn selbst mit massiver Computerhilfe zehn Jahre lang. Im Sommer 1998 gab Hales schließlich bekannt, er habe die Kepler'sche Vermutung bewiesen (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 10).

Doch das Peer-Review-Verfahren der »Annals of Mathematics« ist nun nach vier Jahren an der Erschöpfung der zwölf Gutachter gescheitert. Hales wirbt seither im Internet für sein Projekt »Flyspeck« (www.math.pitt.edu/~thales/flyspeck/). Der Name bedeutet »Fliegendreck«, aber auch »bis ins kleinste Detail prüfen«; außerdem enthält er die Anfangsbuchstaben von »formal proof of Kepler«. Unter einem solchen formalen Beweis versteht Hales ein Computerprogramm, das sich im Gegensatz zu einem »traditionellen mathematischen Beweis« nicht auf menschliche Intuition berufen soll und darum weniger anfällig für logische Fehler sei.

Man sieht, wie Hales hier den Spieß umkehrt. Während die gutachtenden Mathematiker vor seinem computergestützten Beweis erschöpft die Waffen streckten und damit implizit zu verstehen gaben, das für sie Menschenmögliche bilde zugleich eine Grenze des mathematisch Prüfbaren, transferiert Hales das Ideal mathematischer Vollkommenheit vom menschlichen Denken auf den unermüdlichen Computer. Am Fluchtpunkt dieser Perspektive steht eine Mathematik, die in vom Menschen bedienten Rechenmaschinen stattfindet: Der Mathematiker formuliert das Problem als Programm, der Computer berechnet Resultate, die der Mensch als Output empfängt.

Hales nennt konsequenterweise als Ziel seines Flyspeck-Projekts die in Computersprache formulierte Aussage: »Die Kepler'sche Vermutung ist wahr.« Letztlich wüsste allerdings nur der Computer, warum. Durchaus denkbar, dass ein Teil der Mathematik sich in diese Richtung weiterentwickelt. Dann wird eine eigene Hilfsdisziplin entstehen, die sich darauf spezialisiert, einen vom Computer geführten Beweis derart zu interpretieren, dass menschliche Mathematiker ihm halbwegs folgen können.

Michael Springer

MOLEKULARBIOLOGIE

Der Transistor der Zelle

Auch bei der Datenverarbeitung im Nervensystem spielt ein Schaltelement eine wichtige Rolle, das spannungabhängig Ströme steuert: der Kaliumkanal. Eine Röntgenstrukturanalyse zeigt jetzt, wie dieser biologische Transistor funktioniert.

Von Michael Groß

Wohl jeder kennt das winzige Bauelement, das die Stromstärke in Abhängigkeit von einer Steuerspannung regulieren kann und zentraler Bestandteil aller heutigen Computer ist. Vor gut fünfzig Jahren an den Bell-Laboratorien erfunden, hat der Transistor eine schier unglaubliche Karriere gemacht.

Kaum jemand aber weiß, dass es in der Natur ein sogar noch kleineres Gegenstück gibt, das ein ähnliches Erfolgsmodell darstellt. Es existiert schon seit 2,5 Milliarden Jahren und hat sich in dieser Zeit kaum verändert. Gemeint ist der spannungsgesteuerte Kaliumkanal: ein Membranprotein, das bei fast allen Lebewesen vorkommt. Ohne es könnten Nerven und Gehirn nicht funktionieren. Genau wie der technische Transistor lässt dieser biologische Schalter je nach angelegter Spannung einen Strom geladener Teilchen (in diesem Falle Kalium-Ionen) passieren oder nicht.

Um die Existenz solcher Membranproteine wissen die Biologen schon seit langem. Doch erst jetzt ließ sich klären, wie sie im Einzelnen funktionieren. Bisher gab es dazu nur Vermutungen. So leiteten Theoretiker aus der bekannten Aminosäuresequenz des Kaliumkanals ab, welche Bereiche der Proteinkette wahrscheinlich auf der Außenseite der tunnelartigen Schleuse liegen, also mit der Membran Kontakt haben, und welche Abschnitte die Pore nach innen zum wässrigen Milieu hin auskleiden. Außerdem ließ sich denken, dass die auffallend stark geladenen Teile des Proteins in irgendeiner Weise an der Aufgabe beteiligt sein müssten, die an der Membran anliegende Spannung zu messen.

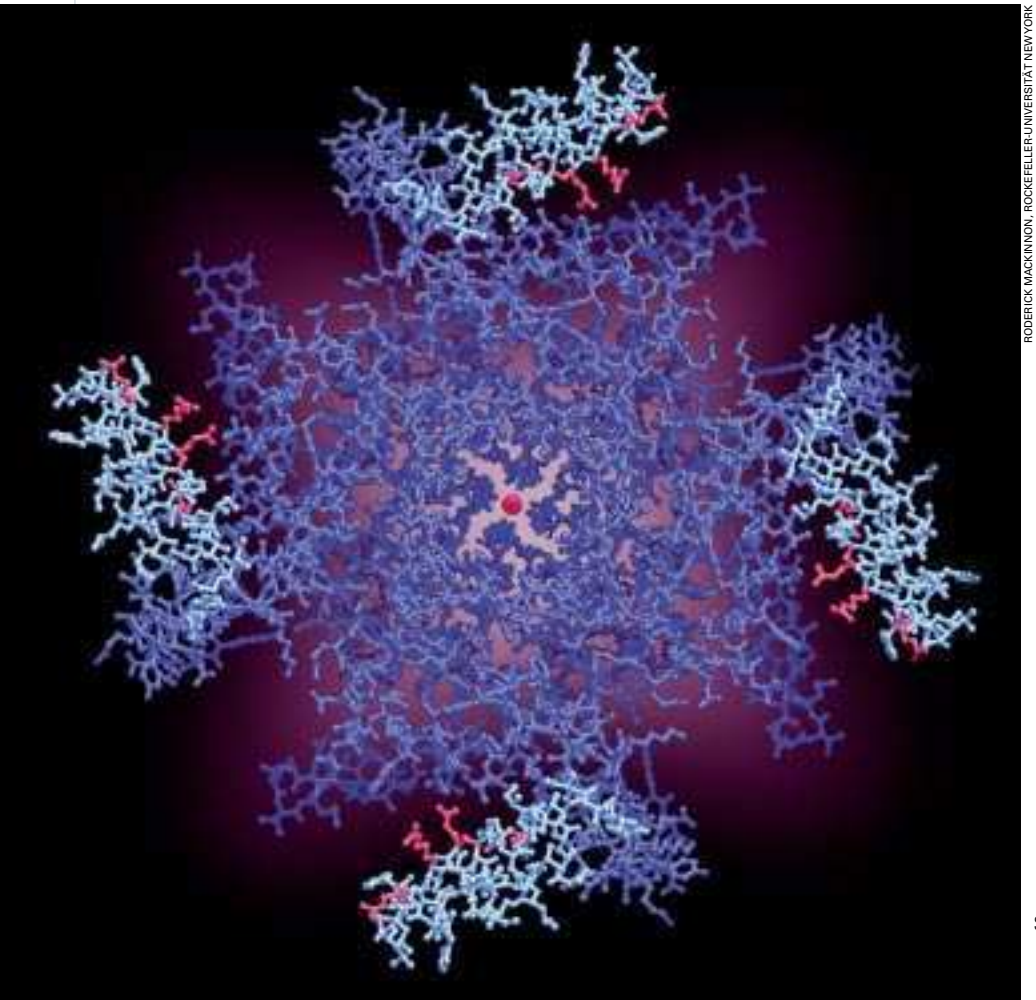
Diese Mutmaßungen sollten sich bestätigen. Dennoch: Als im Mai die Kristallstruktur des Proteins auf der Titelseite der Zeitschrift »Nature« erschien, sah sie völlig anders aus als von den meisten Forschern erwartet.

Warum dauerte es so lange, die genaue Gestalt dieses wichtigen biologischen Schalters zu ermitteln? Für die Röntgenkristallografie benötigt man einen perfekten Kristall, in dem alle Moleküle in identischer Form vorliegen und parallel zueinander angeordnet sind. Membranproteine erweisen sich in dieser Hinsicht als notorisch widerspenstig. Gewohnt, sich einzeln in eine Lipidschicht einzubetten, zeigen sie wenig Lust, sich mit ihresgleichen zu einem Kristall zusammenzulagern. Wenn dann noch elektrisch geladene, bewegliche Komponenten vorhanden sind, fällt die Anordnung in Reih und Glied umso schwerer.

Bändigung eines Zappelphilipps

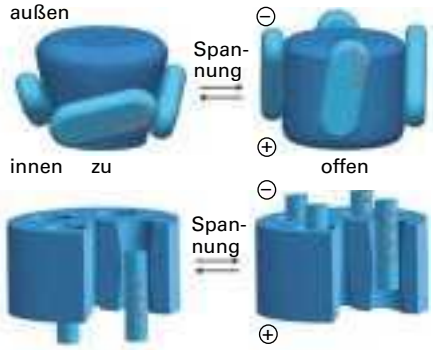
An diesem Problem sind schon viele Versuche zur Strukturbestimmung des Kaliumkanals gescheitert. Deshalb gaben sich Roderick MacKinnon und seine Kollegen an der Rockefeller-Universität in New York besondere Mühe, das zappelige Membranprotein zu bändigen. So wählten sie für ihre Untersuchungen das Exemplar eines extreme Hitze liebenden (hyperthermophilen) Einzellers aus dem Reich der urtümlichen Archaea. Da die Proteine solcher Organismen die für ihre Funktion notwendige Beweglichkeit erst bei hohen Temperaturen erlangen müssen, sind sie im Bereich um 20 Grad Celsius sehr viel starrer als die entwicklungsgeschichtlich verwandten Moleküle normaler Organismen.

Dieser Kunstgriff allein reichte allerdings nicht. Der Kaliumkanal des hyperthermophilen *Aeropyrum pernix* war zwar starr genug, um Kristalle zu bilden. Doch darin herrschte immer noch nicht die nötige Ruhe und Ordnung für eine Röntg- ▷



RODERICK MACKINNON, ROCKEFELLER-UNIVERSITÄT NEW YORK

Der Kaliumkanal ähnelt im geschlossenen Zustand einer Windmühle. Er ist hier in der Aufsicht entlang der Pore in der Mitte (roter Kreis) dargestellt. Die Flügel (hellblau) mit ihren positiv geladenen Arginin-Resten (rot) bewegen sich beim Anlegen einer Spannung.



Y. JIANG ET AL., NATURE, BD. 423, S. 39

Beim Anlegen einer Spannung an die Zellmembran schwenken die Flügel des Kaliumkanals mit ihren positiven Ladungen (rote Kreuze) nach außen und öffnen so die Pore (oben). Die alte Vorstellung von sich verschiebenden Bolzen (unten) hat sich als falsch erwiesen.

genstrukturanalyse. Deshalb verpassten die Forscher dem Ionenkanal zusätzlich »Handschellen«. Dazu erzeugten sie einen monoklonalen Antikörper, der sich spezifisch an die geladene Region heftete, in der die größte Beweglichkeit vermutet wurde. Von ihm schnitten sie den unspezifischen »Stiel« ab und setzten den verbleibenden Teil, ein so genanntes Fab-Fragment, ihren Kristallisationsexperimenten zu. Tatsächlich gaben die damit gefesselten Zappler endlich Ruhe, sodass sich aus den Röntgenbeugungsdaten die hoch aufgelöste Struktur des Ionenkanals ableiten ließ *(Nature, Bd. 423, S. 33)*.

Mit seiner vierzähligen Symmetrie, die an ein Glück verheißendes Kleeblatt erinnert, wirkt der Komplex auch ästhetisch ansprechend. Dass er zusätzlich die vier gebundenen Fab-Fragmente enthält, ist kein Schaden – im Gegenteil: Durch ihre Anordnung an den Rändern des Kleeblatts machen die Antikörper direkt die überraschende Besonderheit der Struktur deutlich.

Manche Forscher hatten sich ausgemalt, dass die beweglichen Ladungsträger eine Art Zapfen bilden, der sich in der die Membran durchdringenden Röhre um einige Nanometer verschieben kann. Tatsächlich sind die Spannungsfühler jedoch nicht im Inneren des Komplexes angeordnet, sondern stehen wie Windmühlenflügel weit vom Zentrum ab. Ihre Verbindung mit dem Hauptteil des Proteins ist zudem scharnierartig dünn und flexibel. Das legt den Schluss nahe, dass sie je nach Spannungslage zwischen der Innen- und der Außenseite der Zellmembran hin und her klappen und die Pore dadurch öffnen oder schließen können.

Die jetzt veröffentlichte Kristallstruktur zeigt den Kanal im geschlossenen Zustand. Dabei befinden sich die Spannungsfühler auf der Innenseite der Zellmembran. Sobald sich die Außenseite negativ auflädt, sollte die elektrostatische Anziehung die positiv geladenen Flügel zu ihr hin schwenken lassen, wodurch sich der Kaliumkanal öffnet (Bild).

Zwar liegt noch keine Röntgenstruktur des offenen Zustands vor, doch konnten MacKinnon und seine Mitarbeiter in einer zweiten Veröffentlichung in derselben Ausgabe von »Nature« (S. 42) die Umklappbewegung mit molekularbiologischen Methoden auch direkt nachweisen. Dazu führten sie mit gentechnischen Verfahren an verschiedenen Punkten des Flügels jeweils einen Cysteinrest ein, der die Ankopplung des Markierungsmoleküls Biotin ermöglichte. Über die starke Bindung zwischen diesem Marker und dem Molekül Avidin ermittelten sie, auf welcher Seite der Membran sich die markierte Stelle befand. Bei einigen der getesteten Cysteinpositionen konnten sie auf diesem Wege tatsächlich den Umschaltvorgang des zellulären Transistors beobachten – also das Schwenken des Flügels von der Innen- zur Außenseite der Membran. Damit hat ein jahrzehntealtes Rätsel endlich seine Lösung gefunden.

Michael Groß ist Biochemiker und Science Writer in Residence am Birkbeck College in London.

EXPERIMENTELLE ÖKONOMIE

Strafe muss nicht sein

Altruistisches Verhalten durch Sanktionen erzwingen zu wollen ist problematisch. Es funktioniert nur, wenn der Betroffene die Strafdrohung auch als angemessen empfindet.

Von Christoph Pöppe

Verfechter einer harten Erziehung sind sich sicher: Nur die Drohung mit Strafe könne den Menschen von schädlichem Tun abhalten. Zwecklos sei der Appell an bessere Einsicht, Edelmut oder Mitgefühl. Erst dann, wenn ein potenzieller Übeltäter sich vorher ausrechnen könne, dass der zu erwartende Nachteil aus der Bestrafung den Vorteil aus der Tat übersteige, werde er von seinem Vorhaben ablassen.

Das steht im Einklang mit dem Standardmodell der Wirtschaftswissenschaftler. Deren *Homo oeconomicus* interessiert sich nur für seinen eigenen Vorteil und sonst gar nichts. Angesichts der herannahenden Straßenbahn vergleicht er deshalb Fahrpreis einerseits und Schwarzfahrergebühr mal Wahrscheinlichkeit des Erwischtwerdens andererseits und entscheidet sich dann für den Kauf eines Tickets – hinreichende Kontrolldichte vorausgesetzt.

Nun hat das Modell des *Homo oeconomicus* in letzter Zeit erhebliche Kratzer bekommen. Beispielsweise fanden Karl Sigmund, Ernst Fehr und Martin A. Nowak heraus, dass Menschen in vielen Situationen nicht ausschließlich ihren Vorteil suchen, sondern auch ihren Vorstellungen von Gerechtigkeit Geltung verschaffen wollen (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 52). Dafür sind sie sogar bereit, Nachteile in Kauf zu nehmen.

Ein neueres Experiment, das Fehr zusammen mit Bettina Rockenbach (damals an der Universität Bonn, jetzt in Erfurt) durchgeführt hat, verschärft diese Aussage noch: Unter bestimmten Umständen wird die Androhung einer Strafe bereits als unfairer Akt empfunden und mit einer verminderten Kooperationsbereitschaft beantwortet *(Nature, Bd. 422, S. 137)*.

Vertrauen lohnt sich – aber nur, wenn es erwidert wird

Fehr und Rockenbach baten Studierende an der Universität Bonn, die um die Mittagszeit zum Essen in die Mensa kamen, um die Teilnahme an einem »Investitionsspiel«. Je zwei Personen – nennen wir sie *A* und *B* – wurden zu einem ungleichen Paar zusammengespannt. Das geschah an-

onym – die beiden bekamen sich nicht zu Gesicht – und nur ein einziges Mal. Damit sollte verhindert werden, dass irgendwelche persönlichen Gefühle der Partner füreinander, die Erwartung einer Gegenleistung oder die Furcht vor Spott und Schande eine Rolle spielten. Aus demselben Grund wurde das Geld, das es bei dem Spiel zu gewinnen gab, sehr diskret ausgezahlt.

Stellen wir uns unter *A* einen Anleger und unter *B* seinen Bankier vor. Beide erhalten vom Spielleiter ein Grundkapital von zehn Geldeinheiten. *A* steht es frei, einen beliebigen Teil davon *B* anzuvertrauen. Der Spielleiter legt noch einmal das Doppelte dazu. *B* darf nun entscheiden, wie viel er von dem überlassenen Kapital plus 200 Prozent Gewinn an *A* zurückzahlt – im Extremfall gar nichts. Am Ende bekommen beide ihr Guthaben in echtem Geld ausbezahlt; in Bonn waren es fünfzig Pfennig pro Geldeinheit plus drei Mark fürs Mitmachen.

Wenn die Spieler einander voll vertrauen, kann jeder sein Grundkapital verdoppeln, indem *A* es komplett aufs Spiel setzt und *B* von dem auf dreißig Einheiten angewachsenen Betrag zwanzig an *A* zurückgibt; die restlichen zehn plus sein Startkapital machen zusammen auch zwanzig. Wenn dagegen das erforderliche Vertrauen fehlt, schleichen beide mit lumpigen zehn Einheiten davon. Insofern gleicht die Situation der im »Gemeinwohl-Spiel«, das Sigmund, Fehr und Nowak früher schon durchgeführt hatten: Vier Personen werfen einen Einsatz ihrer Wahl in einen Gemeinschaftstopf, dessen Inhalt verdoppelt und zu gleichen Teilen an die Spieler ausgezahlt wird: Vertrauen zahlt sich aus – allerdings nur, wenn es erwidert wird.

Während beim Gemeinwohl-Spiel alle vier Partner gleichberechtigt sind, hat im Investitionsspiel jedoch *B* eindeutig die stärkere Position. Er muss sich ja erst entscheiden, nachdem *A* unwiderruflich seinen Vertrauensvorschuss geleistet hat. Nichts hindert ihn, einen gutgläubigen *A* gnadenlos auszunehmen und mit vollen ▷

Im September bei wissenschaft-online

wissenschaft-online

Gerade entdeckt, zeigen sich die wenigsten archäologischen Fundstücke in ihrer ursprünglichen Pracht. Kein Vergleich zu den restaurierten Artefakten, die im Museum zu bewundern sind. Längst bedienen sich Restauratoren modernster Geräte, um dem Zahn der Zeit zu trotzen.

Christian Dominik Wetzler hat für wissenschaft-online den Konservatoren des Römisch-Germanischen Zentralmuseums in Mainz bei ihrer Arbeit über die Schultern geschaut.

Manchmal jedoch stolpern Archäologen auch über sehr gut erhaltene Funde. So geschehen auf der Hibrideninsel South Uist. Hier tauchten Skelette zweier Menschen auf, die offenbar vor mehr als 3000 Jahren mumifiziert wurden, was sie zu den ältesten Mumien Europas machen würde.

Den Bericht von Ulrich Thaler über diese ungewöhnliche Entdeckung sowie viele weitere Meldungen aus der Archäologie lesen Sie unter: www.wissenschaft-online.de/archaeologie

www.wissenschaft-online.de

▷ vierzig Einheiten auf Nimmerwiedersehen zu verschwinden.

Aber so egoistisch sind die Menschen gar nicht – zumindest nicht die Bonner Studenten –, wie sich bei dem Experiment herausstellte. Die *A*s hatten auf dem Zettel, der anonym an den jeweiligen *B* weitergereicht wurde, nicht nur anzugeben, wie viel sie investierten, sondern auch, wie viel sie gerne zurückbekommen würden. Dabei zeigten sie sich bescheiden: Im Durchschnitt erbaten sie nur das 1,8fache ihres Einsatzes, also etwas weniger als das Doppelte, was der vollkommenen Gleichbehandlung entsprochen hätte. Diese Erwartung wurde im Durchschnitt zu immerhin drei Vierteln von den *B*s befriedigt – ein klarer Fall von Altruismus, der sich einzig und allein mit Fairnessprinzipien erklären lässt.

Strafdrohung mindert Großzügigkeit

Noch interessanter als dieses Resultat ist jedoch das Ergebnis einer Variante des Investitionsspiels, bei der es eine »Strafoption« gab. Im Gemeinwohl-Spiel gedeiht das zarte Pflänzchen der Kooperativität enorm, wenn die Teilnehmer Gelegenheit bekommen, ihre unkooperativen Kollegen mit Sanktionen zu belegen, das heißt nachträglich deren Gewinn um einen gewissen Betrag zu schmälern – was sie selbst aber auch eine bestimmte (geringere) Summe kostet. Im Prinzip kann diese Maßnahme nach Belieben verhängt werden, ohne dass ein Fehlverhalten des Betroffenen vorliegt; allerdings setzten die Teilnehmer des Gemeinwohl-Spiels sie wirklich nur als Strafe ein – das aber ausgiebig.

Vom Standpunkt des *Homo oeconomicus* ist diese Handlungsweise vollkommen widersinnig, weil sie den eigenen Gewinn mindert. Schon die schiere Möglichkeit einer Bestrafung veranlasst die Spieler aber zu größerer Kooperativität, wovon wiederum alle profitieren. Damit dürfen sich die Verfechter harter Strafandrohungen bestätigt fühlen.

Das ist aber nur die halbe Wahrheit. In der erwähnten Variante des Investitionsspiels erhielten die *A*s Gelegenheit, ihren jeweiligen *B* für mangelnde Kooperativität, das heißt für Rückzahlungen unterhalb des erwarteten Betrages, zu »bestrafen«. Diesen Begriff haben Fehr und Rockenbach in ihren Anweisungen allerdings sorgfältig vermieden, um den Anschein eines moralischen Vorwurfs nicht aufkommen zu lassen. *A* hatte auf seinem Zettel nur zusätzlich anzukreuzen, ob *B* vier Einheiten vom Guthaben abgezogen werden sollten, wenn er weniger als den gewünschten Betrag zurückzahlte. Im Unterschied zum Gemeinwohl-Spiel war diese Strafandrohung der Kooperation aber nicht förderlich – ganz im Gegenteil!

Wenn *A* das Feld mit der Bestrafungsoption ankreuzte, zahlte der durchschnittliche *B* deutlich weniger aus als bei der ersten Variante des Investitionsspiels, in der *A* keine Sanktionen verhängen konnte. Wenn *A* diese Möglichkeit dagegen hatte, aber keinen Gebrauch davon machte, war die Auszahlung sogar höher als im Fall ohne Bestrafungsoption.

Offensichtlich fühlte sich *B*, den Spielregeln entsprechend, in der Position des Gönners, der durchaus bereit ist, etwas zu geben, das er nicht geben muss, aber darauf besteht, dass seine Gabe freiwillig ist. Also honoriert er es, wenn ihm *A* durch Nicht-Ankreuzen diese Freiwilligkeit bestätigt, und schmollt in Form von Minderzahlung, wenn *A* seine edlen Absichten durch Strafandrohung in Zweifel zieht.

Dabei spielt auch die Frage der Angemessenheit eine Rolle. Der Schmolleffekt fällt deutlich geringer aus, wenn *A* eine relativ bescheidene Forderung (weniger als das Doppelte des Einsatzes) mit Bußgeld bewehrt, als wenn er zu viel verlangt und für den Fall der Untererfüllung auch noch Sanktionen in Aussicht stellt.

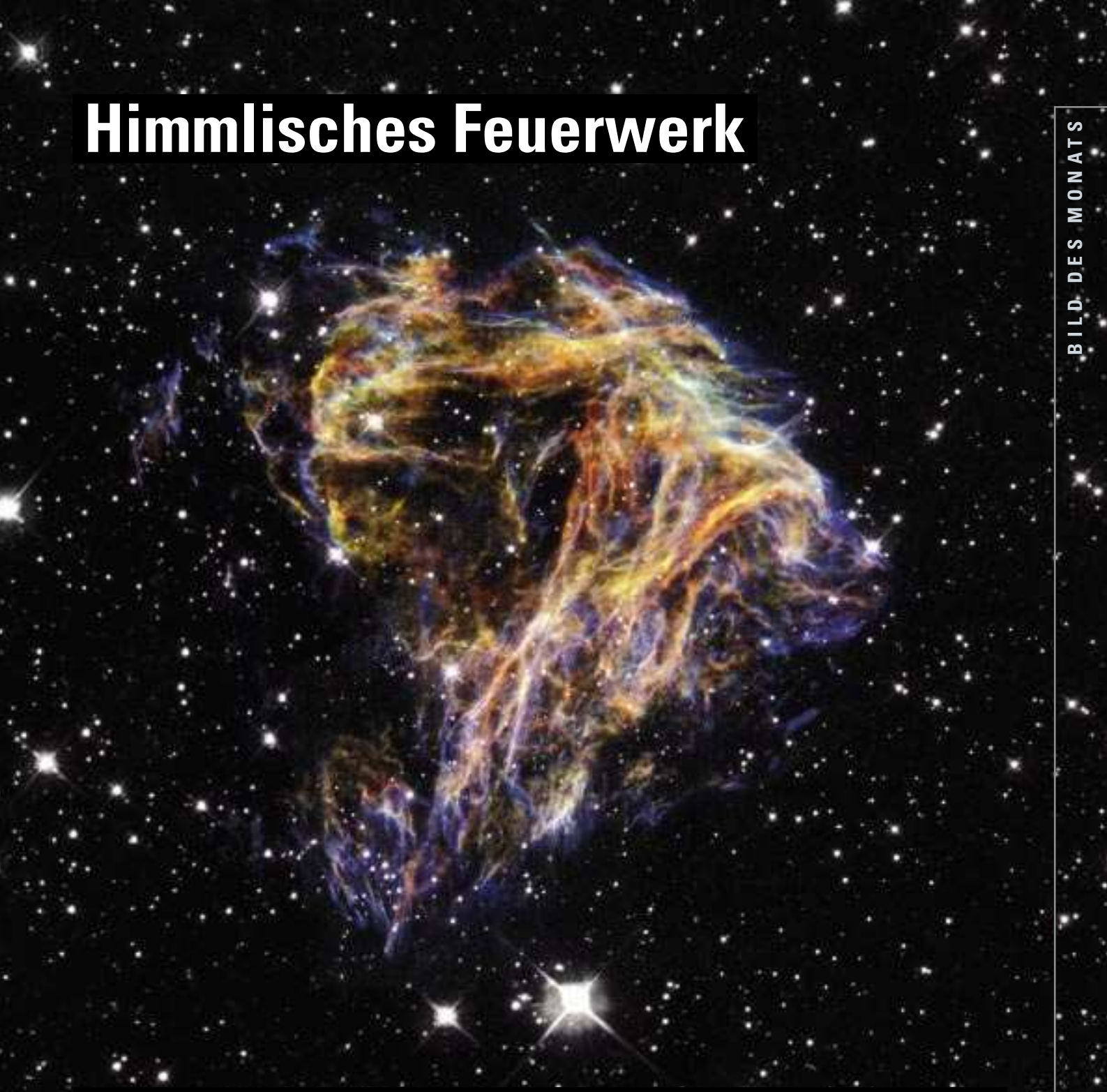
Wohlgemerkt: Die angedrohte Strafe ist nicht wirklich hart. Ein ökonomisch rationaler *B* würde gar nichts auszahlen, die vier Einheiten Verlust in Kauf nehmen und sich immer noch wesentlich besser stellen als die *B*s in dem Bonner Experiment, die ihre freiwillige Gabe sorgsam nach der (wahrgenommenen) Fairness des Partners abstuften.

Die Parallelen zum täglichen Leben sind unverkennbar. Auch hier stehen nur selten wirklich harte Strafen zu Gebote. In vertraglichen Beziehungen aller Art – oder innerhalb einer Familie – ist es oft unmöglich oder kontraproduktiv, die Einhaltung von Vereinbarungen gerichtlich zu erzwingen. Mit der gebotenen Vorsicht wäre also das Ergebnis von Fehr und Rockenbach etwa so zu verallgemeinern: Der Appell an die Fairness des Partners funktioniert durchaus – vorausgesetzt, er wird vom Partner als fair empfunden. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

NASA / HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI / AURA)

Himmlisches Feuerwerk



Was einem wirren Knäuel bunter Luftschlangen ähnlich sieht, ist der Überrest eines kosmischen Spektakels, das vor mehreren tausend Jahren zu bewundern war. Damals flammte eine Supernova am Himmel auf und kündete vom explosiven Ende eines massereichen Sterns in unserer Nachbargalaxie, der Großen Magellanschen Wolke. Während der sterbende Rote Riese unter seiner eigenen Schwerkraft kollabierte, schleuderte er seine äußeren Schichten davon. Die auseinander stiebenden Gas- und Staubmassen verwirbelten sich zu dem heute sichtbaren Netz aus feinen Bändern und Fäden. Der Supernova-Überrest namens N 4 ist hier in einer Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops gezeigt. Mit Farbfiltern wurden aus den Daten der Wide Field Camera die Emissionen von Schwefel, Sauerstoff und Wasserstoff extrahiert und zu diesem Farbbild überlagert. Nicht sichtbar ist der rasch rotierende Neutronenstern, zu dem der Rote Riese schrumpfte. Er verrät sich nur dadurch, dass er wie ein riesiger Leuchtturm die Erde alle acht Sekunden mit einem Kegel aus Radiostrahlung überstreicht. Außerdem sandte er am 5. 3. 1979 intensive Blitze energiereicher Gammastrahlung aus, die von vielen erdumkreisenden Satelliten registriert wurden. Als Ursache sollte sich sein extrem starkes Magnetfeld erweisen. Mit diesem enormen Strahlungsausbruch lieferte das Objekt die ersten Hinweise auf eine neue Klasse exotischer Sterne: der Magnetare (SdW 5/2003, S. 56)

Ein Vierteljahrhundert Informatik

Es brodelt wie in keiner anderen Wissenschaft: Der Computer erobert sich ein Anwendungsfeld nach dem anderen, und das Ende seiner Möglichkeiten liegt selbst für die Theoretiker noch im Dunkeln.

Von Jean-Paul Delahaye

Schneller als jede andere Disziplin hat sich in den letzten 25 Jahren die Informatik entwickelt – und dabei eine Fülle theoretischer Fragen aufgeworfen. Wie immer in solchen Situationen musste man feststellen, dass zu ihrer Bewältigung die verfügbare Mathematik nicht ausreicht, sondern neue Forschungsgebiete zu erkunden sind. So entwickelte sich ein bemerkenswerter Schwung neuer Ideen.

Alles begann in den 1930er Jahren, als Alan Turing, Kurt Gödel und Alonzo Church theoretisch abklärten, was Computer, die es damals noch gar nicht gab, würden berechnen können – und was nicht. Aber erst im letzten Vierteljahrhundert ist der Mathematik ein kraftvoller neuer Zweig gewachsen. Neben die klassische Theorie des Kontinuums trat die Mathematik des Diskreten, der Berechnung und der Information. Auf dem Humus der elektronischen Schaltkreise wuchs ein blühender Garten, von dem wir bis jetzt allenfalls ein paar Hauptwege kennen.

Wie bringt man einen Computer dazu, das zu tun, was man will? Man schreibt ihm eine Liste eindeutiger Anweisungen, die möglicherweise mehrfach auszuführen sind: einen »Algorithmus«. Das klassische, mehr als 2000 Jahre alte Beispiel ist der Euklid'sche Algorithmus, der den größten gemeinsamen Teiler zweier natürlicher Zahlen bestimmt. Theoretisch ist die Zahl der auszuführenden Anweisungen nicht begrenzt; in der Praxis dachte zu Zeiten des mühsamen Handrechnens niemand ernsthaft daran, mehr als allenfalls einige hundert elementare Rechenoperationen zu vollführen. Maschinen, die Millionen, später Milliarden von Rechenschritten fehlerfrei bewältigen, sind etwas qualitativ Neues und erfordern eine neue, in ihrem Kern mathematische Wissenschaft, die Algorithmentheorie.

Die Programmierung von Computern ist weder einfach noch nahe liegend. Eine Methode, die auf dem Papier ganz vernünftig aussieht, kann im Reich der Rechner vollkommen

IBM MEDIAPOOL

SERIE

25 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

Teil I: Paläoanthropologie
Teil II: String-Physik
Teil III: Gehirnforschung
Teil IV: Klimaforschung
Teil V: Mathematisches Denken
Teil VI: Ultrakalte Atome
Teil VII: Die Chemie beherrschen
Teil VIII: Entzifferung des Genoms
Teil IX: Informationstheorie

Im nächsten Heft
Teil X: Gele und Sand

verfehlt sein. So gibt es für die Lösung eines linearen Gleichungssystems eine elegante, geschlossene Formel, die Cramer'sche Regel. Aber sie erfordert wesentlich höheren Rechenaufwand als andere Methoden und ist für Systeme mit mehr als zwanzig Gleichungen praktisch unbrauchbar. Die Kunst besteht darin, Algorithmen zu ersinnen, die eine vorgegebene Aufgabe in möglichst kurzer Zeit bewältigen. Im Gegensatz zu der naiven Vorstellung vom Supercomputer erübrigt die Leistungsfähigkeit der Maschine nicht das eigene Denken. Im Gegenteil: Je leistungsfähiger eine Maschine ist, umso mehr (mathematische) Vorarbeit ist erforderlich, um sie richtig einzusetzen.

Hochgeschwindigkeitsberechnung

Das gilt bereits für eine so alltägliche Aufgabe wie die Multiplikation zweier natürlicher Zahlen – wenn diese Tausende oder Millionen von Ziffern haben. In den 1970er Jahren entwickelte man ein Verfahren, zwei n-stellige Zahlen in einer Zeit miteinander zu multiplizieren, die proportional zu $n \log(n) \log(\log(n))$ ist. (Dabei bezeichnet log den natürlichen Logarithmus.) Praktisch ist diese Rechenzeit so gut wie proportional zu n und damit viel kürzer als diejenige des klassischen Verfahrens, das im Wesentlichen gleich der uralten Schulmethode ist und eine Rechenzeit proportional zu n^2 erfordert.

Ein interessantes Anwendungsgebiet von Algorithmen ist die Berechnung mathematischer Konstanten wie π, e oder $\sqrt{2}$. Dank der jüngsten Fortschritte sind die wichtigsten unter ihnen inzwischen auf mehrere Milliarden Stellen hinter dem Komma bekannt. Gelegentlich gibt es dabei Überraschungen, wie eine neue Formel zur Berechnung von π. Bis vor kurzem war die berühmte Kreiszahl wie ein Buch, das man Seite für Seite lesen musste: Eine Ziffer dieser Zahl konnte man nur ermitteln, wenn man alle vorangehenden Ziffern schon bestimmt hatte. Im Jahr 1995 gelang es einer kanadischen Forschergruppe, diesen Zwang zu durchbrechen: Jonathan und Peter Borwein sowie Simon Plouffe entdeckten eine neue Formel, mit der man die Ziffern der Binärdarstellung von π unabhängig voneinander berechnen kann (Spektrum der Wissenschaft 5/1997, S. 10). Mithilfe dieser Formel ermittelte Colin Percival fünf Jahre später die 10^{15}-te Binärstelle von π und noch einige in deren Nachbarschaft – eine Leistung, die jahrhundertelang als unmöglich gegolten hatte.

Ein weiterer Erfolg der modernen Algorithmentheorie ist die Entdeckung sehr großer Primzahlen: 1999 fand man eine Primzahl mit mehr als 2 Millionen Ziffern, 2001 eine mit 4 Millionen. In diesem Zusammenhang war die Entdeckung probabilistischer Primzahltests in den 1970er Jahren eine Überra- ▷

Ein Vierteljahrhundert Hardware-Entwicklung: Weltspitze war 1978 der Großrechner IBM 3033 mit – je nach Modell – vier bis acht Megabyte Hauptspeicher und einem Preis von ungefähr 3,5 Millionen Dollar (unten). Heute kann man das PowerBook G4 von Apple (oben) bei weit höherer Leistung zu einem Tausendstel dieses Preises kaufen – und unter dem Arm wegschleppen.

schung. Solche Tests sagen aus, ob eine gegebene Zahl eine Primzahl ist – aber nicht mit Gewissheit, sondern mit einer sehr kleinen Irrtumswahrscheinlichkeit (Spektrum der Wissenschaft 2/1983, S. 80). Mittlerweile hat, dank leistungsfähiger Computer, die ehedem sehr esoterische Wissenschaft von den Primzahlen handfeste Anwendung gefunden: in der Kryptographie (Spektrum Dossier 4/2001 »Kryptographie«).

Die Kunst des Schnellrechnens

In den letzten 25 Jahren hat sich die Algorithmentheorie weit über die Einzelfall-Fragestellungen der Informatik hinaus zu einer gewissen Reife entwickelt. Dabei hat sie tief liegende Verbindungen zur Mathematik geknüpft und unsere Sichtweisen stellenweise radikal verändert. In den Buchhandlungen erschienen Arithmetiklehrbücher einer neuen Art, die zu jedem neuen Begriff ein algorithmisches Werkzeug zum effizienten Umgang mit diesem Begriff auf dem Computer bereitstellen.

Man muss Mathematik investieren, um den Computer zu beherrschen, aber der Computer gibt der Mathematik auch etwas zurück. Er eröffnet neue Sichtweisen auf abstrakte Objekte, die eine (geeignet instruierte) Maschine besser zu handhaben versteht als der menschliche Geist – in jedem Falle mit unvergleichlich größerer Sicherheit und Genauigkeit.

Die Fortschritte der Algorithmentheorie strahlen nicht nur auf die Arithmetik, sondern auf einen wesentlichen Teil der Mathematik insgesamt aus. Die Computeralgebra, bei der die Maschine nicht nur Zahlen, sondern auch Symbole, Funktionen, Gleichungen, Matrizen und so weiter miteinander verknüpft, hat sich in den letzten 25 Jahren beachtlich entwickelt (Spektrum der Wissenschaft 3/1996, S. 88). Über Taschenrechner, die Symbole manipulieren können, und die zugehörige Software hat sie ihren Platz in den Gymnasien und Ingenieurbüros gefunden. Auch hier führt der Einbruch des Computers in die Welt der abstrakten Objekte zu einer neuen Art der angewandten Mathematik.

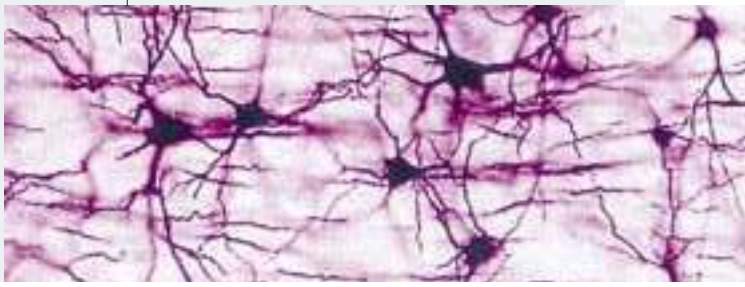
Über ihren belebenden Einfluss auf alte Forschungsgebiete hinaus haben die Algorithmen neue Anwendungsgebiete aufgetan. Als Beispiel sei die Rekonstruktion von Stammbäumen genannt. Früher bearbeitete man die morphologischen oder molekularen Daten von Hand – mit Methoden, die unvermeidlich in ihrer Komplexität beschränkt waren. Durch den Computer sind nicht nur umfangreichere Datenmengen, sondern auch komplexere und leistungsfähigere Verfahren in den Bereich des Machbaren gerückt. Diese ihrerseits sind unter anderem von der Graphentheorie und der Statistik inspiriert.

Ganz allgemein ist aus der Verarbeitung von Daten der Molekularbiologie ein neues,

Fortschritte der Algorithmentheorie

In einigen Bereichen wurde in den letzten Jahren besonders intensiv geforscht (in Klammern Verweis auf einen Artikel zum jeweiligen Thema in Spektrum der Wissenschaft):

- **paralleles Rechnen**, das heißt Arbeiten mit Computern, die mehrere gleichzeitig arbeitende Rechenwerke (»Prozessoren«) enthalten (9/2002, S. 14);
- **verteilte Berechnung**: Ein Problem wird in Teile zerlegt und diese an zahlreiche voneinander getrennte Computer delegiert (6/2002, S. 80 und 7/2003, S. 66);
- **Bildverarbeitung**, insbesondere Erstellung von fraktalen Bildern (9/1989, S. 52);
- **Datenkompression**, deren praktische Bedeutung unablässig wächst (7/2001, S. 84);
- **probabilistische Algorithmen**, die voraussetzen, dass der Computer über echte Zufallszahlen verfügt (4/1994, S. 64);
- **genetische Algorithmen**, welche auf der aus der Evolution entlehnten Metaphorik von Variation und Selektion beruhen (9/1992, S. 44);
- **neuronale Netze**, deren Algorithmen für das automatische Lernen dem Lernen von lebenden Organismen nachempfunden sind (11/1992, S. 134);
- **Analyse von Algorithmen** zur Abschätzung ihrer Geschwindigkeit (4/1999, S. 76).



Der Gral der theoretischen Informatik

Eins der bedeutendsten Probleme der theoretischen Informatik ist die Faktorisierung. Es geht darum, eine natürliche Zahl in ihre Primfaktoren zu zerlegen. Beispiel: 123 456 789 = 3×3×3803×3607.

Trotz aller Fortschritte der letzten zwanzig Jahre kennt man bis heute kein Verfahren, mit dem man (selbst mit vernetzten Computern) in vernünftiger Rechenzeit Zahlen mit mehr als 200 Stellen faktorisieren könnte. Man vermutet, dass es keinen Algorithmus gibt, der eine *n*-stellige Zahl in einer Rechenzeit proportional zu *n*, zu n^2 oder auch nur zu n^p mit einer beliebigen natürlichen Zahl *p* faktorisieren könnte: Das Problem der Faktorisierung ist vermutlich nicht in polynomialer Rechenzeit zu lösen. Anders ausgedrückt: Das Faktorisierungsproblem gehört nicht zur Komplexitätsklasse P. Diese Vermutung ist bis jetzt noch unbewiesen.

Andererseits lässt sich die Korrektheit einer vorgelegten Primfaktorzerlegung ohne größere Mühe in polynomialer Zeit nachprüfen: Es ist nicht schwer nachzurechnen, dass $3 \times 3 \times 3803 \times 3607 = 123\,456\,789$ ist. Deshalb sagt man, dass das Faktorisierungsproblem zur Klasse NP gehöre. Die (irreführende) Bezeichnung NP bedeutet keineswegs »nicht in polynomialer Zeit lösbar«, sondern »in polynomialer Zeit nachprüfbar«.

Es scheint klar, dass die Klasse NP nicht mit der Klasse P zusammenfällt – denn es ist einfacher, eine bereits gefundene Lösung zu bestätigen als diese zu ermitteln! Dennoch gehört der Nachweis der Behauptung $P \neq NP$ zu den widerspenstigsten Rätseln der Komplexitätstheorie. Für ihren Beweis (oder den des Gegenteils) ist ein Preis von einer Million Dollar ausgesetzt. Als das Problem vor 25 Jahren formuliert wurde, hoffte man, es schnell lösen zu können. Diese Hoffnung hat bis heute getrogen, trotz aller Bemühungen (und der Attraktivität des Preises).

1994 revolutionierte Peter Shor die theoretische Informatik, als er einen Faktorisierungsalgorithmus mit polynomialer Zeit angab, der auf einem Quantencomputer laufen würde. Das löst nicht die Frage, ob $P \neq NP$ ist, zeigt aber, dass funktionsfähige Quantencomputer (die es heute noch nicht gibt) die Informatik und insbesondere die Kryptographie tief greifend verändern würden.

TU BERLIN / PRESSESTELLE

Peter Shor von der Forschungsabteilung von AT&T wurde 1998 für sein Faktorisierungsverfahren auf einem Quantencomputer mit dem Nevanlinna-Preis (dem »Nobelpreis für Informatik«) ausgezeichnet.

halb theoretisches, halb angewandtes Fachgebiet hervorgegangen: die Bioinformatik. Sie gewinnt immer mehr an Bedeutung und wird vielleicht die Biologie ebenso auf mathematische Füße stellen, wie es vor langer Zeit der Physik ergangen ist.

Logik, die Mutter der Informatik

Das Fundament, auf dem die so stürmisch voranschreitende Algorithmentheorie ruht, ist schon sehr alt: die mathematische Logik. Gleichwohl ist auch sie in Bewegung geraten und hat vor allem unsere Ansichten über das Programmieren nachhaltig beeinflusst. Zu Beginn der 1970er Jahre wurde die Idee der deklarativen Programmierung formuliert: Der Mensch muss nur noch sein Problem beschreiben; die Maschine übernimmt es dann, es zu lösen. Das wäre eine ungeheure Arbeitserleichterung, aber natürlich sind die Grenzen dieser Utopie offensichtlich: Wenn es zu einem Problem mehr als einen Algorithmus gibt, wie soll dann die Maschine entscheiden? Immerhin: Die Programmiersprache PROLOG, die Alain Colmerauer und seine Kollegen 1973 in Marseille implementierten, ist ein erfolgreicher Kompromiss zwischen dem Wünschenswerten und dem Machbaren. PROLOG beruht auf den Techniken des automatischen Beweisens: Die Maschine leitet aus Formeln, die als Axiome akzeptiert sind, Folgerungen ab. Die dafür entwickelten Ideen sind verallgemeinert worden und spielen in der künstlichen Intelligenz und bei den Expertensystemen eine wichtige Rolle.

Ebenfalls der mathematischen Logik entsprungen ist die Idee vom beweisbar korrekten Programm. Man gibt der Maschine einen in Symbolen der Logik geschriebenen Beweis eines Satzes, zum Beispiel: Zu jeder Zahlenfolge *T* gibt es eine Folge *S*, die dieselben Elemente wie *T* enthält, aber nach aufsteigender Größe sortiert. Aus diesem Beweis macht die Maschine ein Programm, von dem man sicher sein kann, dass es keinen Fehler enthält. In unserem Beispiel ordnet das Programm die Elemente der Folge *T* der Größe nach, was die Folge *S* ergibt. Dieser viel versprechende Ansatz zur Erzeugung fehlerfreier Software hat schon mehrere Erfolge bei der Verifikation von Programmen und Mikrochips erzielt.

In der Forschung zur künstlichen Intelligenz spielen neue Varianten der Logik eine wichtige Rolle. Diese »nicht-klassischen« Logiken zielen darauf ab, das menschliche Denken zu modellieren, das komplexer ist als das ma- ▷

▷ thematische. So können die parakonsistenten Logiken Daten mit Widersprüchen verarbeiten. Die nichtmonotonen Logiken berücksichtigen, dass eine abgeleitete Aussage durch zusätzliche Informationen widerlegt werden kann. Weiter gibt es die Fuzzy Logic (Spektrum der Wissenschaft 3/1993, S. 90), die partielle Logik, die Modallogik und die mehrwertigen Logiken, die außer »wahr« und »falsch« noch andere Wahrheitswerte kennen.

Allgemein lehrt uns die mathematische Logik, dass die Programmierung von Computern unter allen möglichen Gesichtspunkten angegangen werden sollte – und dass große Abstraktheit kein Makel ist. Ein guter Algorithmus ist zunächst nichts weiter als eine Idee; dennoch kann er bis zu einem nützlichen Produkt weiterentwickelt werden.

Die kryptographische Welle

Ein spezielles Teilgebiet der theoretischen Informatik erlebte in den letzten 25 Jahren eine noch größere Revolution als alle anderen. Die frühere militärische Geheimwissenschaft ist zu einer zivilen Angelegenheit geworden, die anlässlich ihrer alljährlichen Kongresse eine stattliche Gemeinschaft von Wissenschaftlern versammelt: die Kryptographie.

Auslöser war die Entdeckung der Kryptographie mit veröffentlichtem Schlüssel *(public key cryptography)* Anfang der 1970er Jahre. Der Klartext wird mithilfe eines allgemein bekannten Schlüssels chiffriert; dagegen erfordert die Entschlüsselung die Kenntnis eines geheimen Schlüssels, der zwar durch den öffentlichen Schlüssel eindeutig bestimmt, aber nicht ohne übermäßigen Aufwand aus diesem herzuleiten ist (Spektrum der Wissenschaft 10/1979, S. 92). Die fortgeschrittenste Ausgestaltung des Prinzips ist das RSA-Verfahren, benannt nach Ronald Rivest, Adi Shamir und Leonard Adleman, die es 1977 entdeckten. (Inzwischen weiß man, dass Clifford Cocks und seine Kollegen dasselbe Verfahren schon 1973 gefunden hatten, aber nicht darüber sprechen durften.)

Mithilfe dieser Verfahren kann man, ohne vorher geheime Schlüssel auszutauschen, sicher mit einem Partner kommunizieren, dessen Identität überprüfen und eine Nachricht unfälschbar als die eigene kennzeichnen (die »elektronische Unterschrift«). Weitere Forschungen im Bereich der Kryptographie haben zur Entwicklung von effizienten und sicheren Pseudo-Zufallsgeneratoren geführt, was die Übermittlung geheimer Nachrichten mit einfachem Schlüssel (derselbe für Ver- und Entschlüsselung) sehr erleichtert (Spektrum der Wissenschaft 6/1999, S. 26).

Diese Entdeckungen zeigen einen wundervollen Weg von der abstraktesten Theorie zur konkretesten Praxis. Lange Zeit galt die Zahlentheorie als brotlose Kunst; nun findet sie eine unentbehrliche Anwendung in der Welt des Geldes. Die theoretische Informatik ist nicht etwa eine kostspielige und unnütze Spielerei zur Befriedigung des Intellekts. Vielmehr wäre unsere Welt ohne sie nicht das, was sie ist. Unsere Scheckkarte mit Chip ebenso wie die gesicherte Zahlung über das Internet beruhen auf hochabstrakter Mathematik.

Noch bleiben Fragen offen. Die Sicherheit vieler kryptographischer Algorithmen beruht darauf, dass bestimmte Probleme als »schwer« gelten (in einem unten zu präzisierenden Sinn). So beruht beispielsweise die Sicherheit von RSA darauf, dass die Faktorisierung großer Zahlen schwer ist. Das bezweifelt zwar niemand ernsthaft, aber bewiesen ist es nicht. Die Sicherheit vieler kryptographischen Methoden hängt also, entgegen mancher öffentlichen Bekundung, von einer unbewiesenen mathematischen Behauptung ab.

Fragen dieser Art gehören zu dem viel umfangreicheren Problemkreis, der den Kern der theoretischen Informatik ausmacht: zur Theorie der Berechenbarkeit. Diese ist in den 1930er Jahren entstanden und hat vor allem negative Resultate zu bieten: So ist es beispielsweise unmöglich, ein Programm zu schreiben, das unter verschiedenen Programmen diejenigen auswählt, die dieselbe Funktion berechnen. Unmöglichkeitsbeweise dieser Art haben in den letzten 25 Jahren die Grenze zwischen dem algorithmisch Berechenbaren und dem Nichtberechenbaren genauer abgesteckt.

Diese seit dreißig Jahren ständig weitergeführten Forschungen ebneten den Weg zu neuen, detaillierten Fragen der folgenden Art: Kann man eine n-stellige Zahl in polynomialer Zeit (das heißt, die Rechenzeit ist proportional einer Potenz von n) faktorisieren (siehe Kasten Seite 23)? Die Probleme, die in polynomialer Rechenzeit gelöst werden können, bilden die Komplexitätsklasse P. Ein Problem aus P ist also nicht nur lösbar, sondern sogar effizient (das heißt in polynomialer Zeit) lösbar. »Schwer« wird als das Gegenteil von »effizient lösbar« definiert.

Wenn allerdings eine Faktorisierung einer n-stelligen Zahl vorgelegt wird, lässt sich in polynomialer Zeit überprüfen, ob diese korrekt ist. Die Probleme, deren Lösungen sich in

Ein neues Verständnis des Zufalls

Die Fortschritte der theoretischen Informatik haben tiefe Zusammenhänge zwischen Berechnung und Zufall offen gelegt. Dank der Arbeit der Theoretiker konnten drei Arten des Zufalls identifiziert werden:

▶ Der **schwache Zufall** ist das, was die Pseudo-Zufallszahlengeneratoren der gängigen Programmiersprachen erzeugen. Er ist ohne großen Rechenaufwand zu haben – geeignete Algorithmen liefern mehrere Millionen pseudozufälliger Stellen pro Sekunde – und genügt, um beispielsweise das Verhalten der Fahrzeuge im Straßenverkehr zu simulieren.

▶ Der **kryptographische Zufall** ist in seiner Erzeugung aufwendiger, aber unerlässlich für die Sicherheit in der Kryptographie. In diesem Gebiet wurden in den letzten 25 Jahren wichtige Resultate erzielt.

▶ **Echten Zufall** können Algorithmen nicht erzeugen – dennoch ist er nicht völlig unzugänglich. Die Komplexitätstheorie von Kolmogorow, ein für die theoretische Informatik fundamentales Gebiet, hat wertvolle Einsichten zu Tage gefördert. Echt zufällig ist eine Zeichenfolge, die »unbegreiflich« ist, das heißt nicht durch eine kürzere Zeichenfolge eindeutig beschrieben werden kann. Auch auf diesem Gebiet gab es in den letzten dreißig Jahren bedeutende Entwicklungen.

polynomialer Zeit verifizieren lassen, bilden die Klasse NP. Es ist heute bekannt, dass das Problem der Faktorisierung zur Klasse NP gehört. Dass es nicht zur Klasse P gehört, wird vermutet, ist aber bislang nicht bewiesen.

Dieser Mangel an Gewissheit ist sehr unangenehm, denn er betrifft einen zentralen Punkt der Komplexitätstheorie. So lange diese Frage nicht geklärt ist, kommen Bemühungen, die Sicherheit der gängigsten Methoden zu beweisen, nicht voran.

Dennoch war die Arbeit der letzten 25 Jahre nicht vergeblich. So konnte eine große Zahl neuer Schwierigkeitsklassen identifiziert werden. Sie bilden ein detailliertes Panorama, das uns hoffentlich den Weg zu der heiß ersehnten Lösung weisen wird.

Die Geburt der Quanteninformatik

Die wahre Theorie unserer physikalischen Welt ist nicht die klassische Mechanik, sondern die Quantenmechanik. Wenn wir eines Tages fähig sein sollten, zahlreiche Quantenzustände unabhängig voneinander zu präparieren und sie ungestört miteinander wechselwirken zu lassen, dann könnten wir einen Quantencomputer bauen. Seine Bauteile befinden sich nicht mehr in einem von zwei eindeutig bestimmten Zuständen (»0« und »1« wie in einem klassischen Computer), sondern in einer quantenmechanischen Überlagerung dieser beiden Zustände (Spektrum der Wissenschaft 12/1995, S. 62). Auf die theoretische Informatik, die bislang stillschweigend von einer klassischen (newtonschen) Physik ausging, kommen damit etliche Neuigkeiten zu.

So gibt es in der Kryptographie Verfahren für den geheimen Nachrichtenaustausch, deren Sicherheit nicht mehr auf unbewiesenen Vermutungen beruht, sondern auf den Grundannahmen der Quantenmechanik. Diese Protokolle verwenden polarisierte Photonen und wurden in den letzten Jahren konkret realisiert (Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 86).

Das zweite Resultat wurde 1994 von Peter Shor entdeckt. Er bewies, dass ein Quantencomputer – im Gegensatz zu einem klassischen – in der Lage ist, natürliche Zahlen in polynomialer Zeit zu faktorisieren. Mit dem Quantencomputer wird also bislang Nichtberechenbares berechenbar; zu den Klassen P und NP kommen folglich neue quantenmechanische Komplexitätsklassen hinzu. Obendrein würde die Realisierung von Quantencomputern, die heute noch in weiter Ferne liegt, schwer wiegende Umwälzungen für die Kryptographie mit sich bringen.

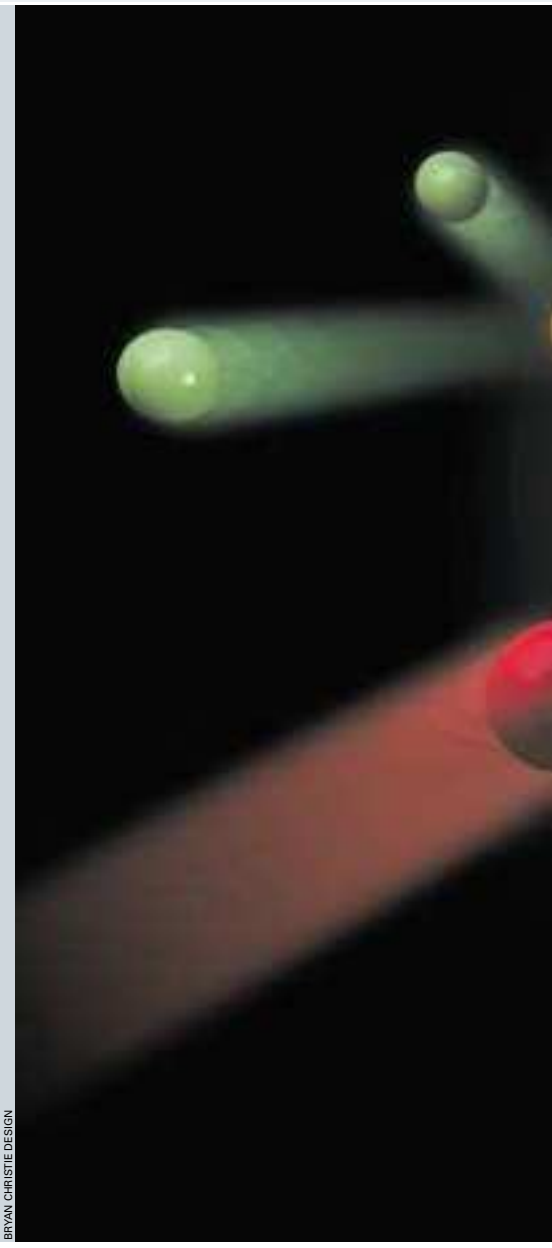
In der Tat kommt aus der Quantenmechanik eine neue Sichtweise der Informatik und der Berechnung; bislang als absolut gültig betrachtete Modelle werden in Frage gestellt. Alle Computer der Gegenwart sind theoretisch äquivalent der klassischen Turing-Maschine, die alle Arten von Berechnungen mit Bits ausführen kann – aber nur mit klassischen Bits. Die klassische Turing-Maschine muss der Quanten-Turing-Maschine Platz machen. ◁

Jean-Paul Delahaye ist Professor für Informatik an der Université des Sciences et Technologies in Lille. Für »Pour la Science«, die französische Schwesterzeitschrift von Spektrum der Wissenschaft, hat er bereits mehr als hundert Beiträge verfasst.

AUTOR

Neue Physik jenseits des Standard-modells

Das Standardmodell der Teilchenphysik steht an einem historischen Wendepunkt. Noch ist sein Erfolg konkurrenzlos – aber zugleich zeichnet sich bereits seine Ablösung ab.



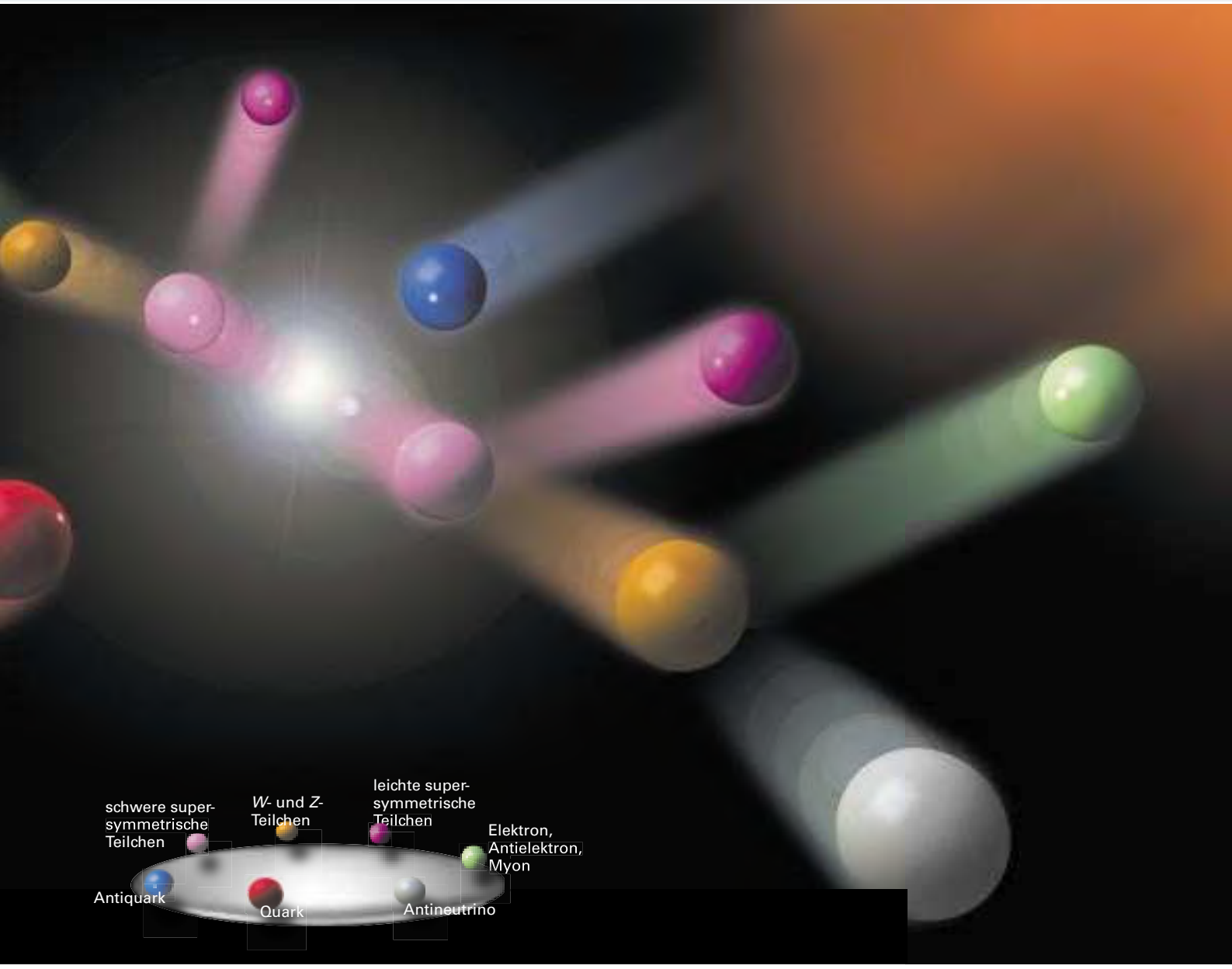
BRYAN CHRISTIE DESIGN

Von Gordon Kane

Seit Jahrhunderten suchen Philosophen und Naturforscher nach den Urbausteinen, aus denen all die Vielfalt und Schönheit unserer Alltagswelt sich zusammensetzt – und gegenwärtig lautet die erstaunlich einfache Antwort: Im Grunde reichen sechs Teilchenarten aus. Sie heißen Elektron, Up- und Down-Quark, Gluon, Photon und Higgs-Boson. Elf zusätzliche Teilchen genügen, um auch noch die exotischsten Phänomene zu beschreiben, welche die Teilchenphysiker untersuchen. Das ist nicht bloße Spekulation wie die vier Elemente der alten Griechen – Erde, Wasser, Luft und Feuer –, sondern folgt aus der raffiniertesten mathematischen Theorie, die je zur Naturbeschreibung ersonnen wurde. Trotz des Namens »Standardmodell der Teilchenphysik« handelt es sich dabei nicht nur um ein Modell, sondern um eine umfassende Theorie, die die Elementarteilchen charakterisiert und ihre Wechselwirkungen beschreibt. Alles, was in unserer Welt geschieht – mit Ausnahme der Wirkung der Schwerkraft –, gehorcht letztlich den Regeln und Gleichungen für Teilchen des Standardmodells.

Das Standardmodell wurde in den 1970er Jahren formuliert und Anfang der 1980er Jahre erstmals durch Experimente gestützt. Seit fast drei Jahrzehnten hat die Theorie jeden noch so harten Test bestanden. Dieser Erfolg ist einerseits erfreulich, denn er bestätigt, dass wir tatsächlich tiefer als je zuvor verstehen, wie die Natur funktioniert. Doch andererseits hat der Erfolg auch etwas Lähmendes. Bevor es das Standardmodell gab, waren die Physiker gewohnt, dass die Experimente, kaum hatte sich der Kreidestaub auf der gerade etablierten Theorie gesetzt, bereits neuartige Teilchen oder andere Hinweise auf eine neue Theorie lieferten. Nun warten sie schon dreißig Jahre darauf, dass dies mit dem Standardmodell geschieht.

Das Warten dürfte bald vorbei sein. Experimente bei bislang unerreichten Kollisionsenergien oder mit ungeahnt hoher Messgenauigkeit sind im Begriff, über das Standardmodell hinauszugehen. Diese Resultate werden das Modell nicht umstürzen, sondern es durch die



Wenn in diesem hypothetischen Szenario ein Quark und ein Antiquark frontal zusammenprallen, entstehen zwei schwere supersymmetrische Teilchen. Sie zerfallen sofort in *W*- und *Z*-Teilchen sowie zwei leichtere supersymmetrische Partikel. Die *W*- und *Z*-Teilchen zerfallen ihrerseits in ein Elektron, ein Antielektron und ein Myon, die im Detektor charakteristische Spuren hinterlassen. Zudem entsteht ein Antineutrino.

Entdeckung neuer Teilchen und Kräfte erweitern. Ein einschlägiges Experiment findet seit 2001 am verbesserten Tevatron-Collider des Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia (US-Bundesstaat Illinois) statt. Dabei könnten unmittelbar hypothetische Teilchen namens Higgs-Bosonen entstehen, die das Standardmodell komplettieren, oder Partikel, die von der plausibelsten Erweiterung der Theorie vorhergesagt werden, die so genannten Superpartner der bekannten Teilchen.

Auch von den »B-Fabriken« kommen wichtige Daten. Diese Teilchenschleudern in Kalifornien und Japan sind darauf angelegt, milliardenfach das Bottom-Quark – eines der elf zusätzlichen Teilchen – und sein Antiteilchen zu erzeugen, um daran die so genannte *CP*-Verletzung zu studieren (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/1998, S.90). *CP* steht für Ladungsparität *(charge-parity)*, die Symmetriebeziehung zwischen Materie und Antimaterie. *CP*-Verletzung bedeutet, dass Antimaterie in ihrem Verhalten nicht das exakte Spiegelbild von Materie ist. Das bisher in Teilchenzerfällen beobachtete Ausmaß der *CP*-Verletzung lässt sich mit dem Standardmodell vereinbaren, aber es gibt gute Gründe, eine viel stärkere Verletzung zu erwarten, als das Modell zulässt. Erst eine Physik, die über das Standardmodell hinausgeht, vermag eine zusätzliche *CP*-Verletzung zu erzeugen.

Die Physiker untersuchen auch die präzisen elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Teilchen. Dem Standardmodell zufolge verhalten sich Elektronen und Quarks wie mikroskopische Magnete einer spezifischen Stärke, und in einem elektrischen Feld darf ihr Verhalten nur von ihrer elektrischen Ladung ▷

▷ abhängen. Die meisten Erweiterungen des Standardmodells sagen gewisse Abweichungen bei magnetischer Stärke und elektrischem Verhalten voraus. Neue Experimente ermöglichen derart empfindliche Messungen, dass selbst diese winzigen Effekte nachweisbar sein werden.

Erst vor kurzem haben Astrophysiker beim Studium der Neutrinos, die von der Sonne und mit kosmischer Strahlung zur Erde gelangen, zweifelsfrei nachgewiesen, dass diese geisterhaften Partikel, die praktisch ohne Wechselwirkung den Erdball durchqueren, eine gewisse Masse besitzen (siehe Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 21). Das war von Theoretikern, die an Erweiterungen des Standardmodells arbeiten, schon lange erwartet worden. Die nächste Versuchsserie wird klären, welche Art von Theorie die beobachtete Neutrinomasse zu erklären vermag.

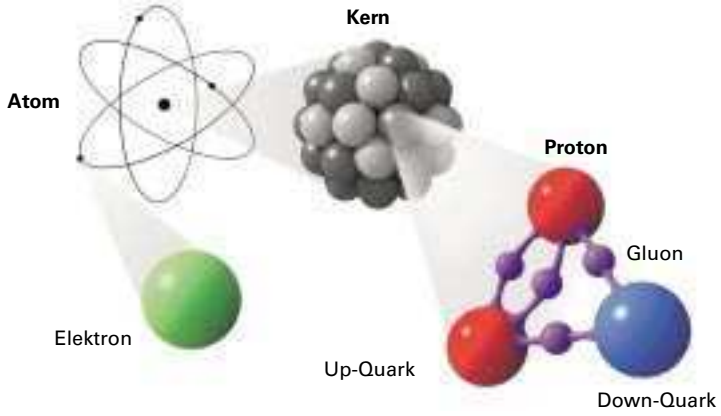
Außerdem sind Versuche im Gange, die hypothetischen Partikel zu entdecken, aus denen die kalte dunkle Materie im Universum bestehen soll, und noch genauer als bisher zu erforschen, ob Protonen zerfallen. Ein Erfolg eines der beiden Projekte wäre ein Meilenstein der Physik jenseits des Standardmodells.

Um das Jahr 2007 wird der große Hadronen-Collider (*Large Hadron Collider*, LHC) den Betrieb aufnehmen, ▷

IN KÜRZE

- Das **Standardmodell der Teilchenphysik** ist die erfolgreichste Theorie der Wissenschaftsgeschichte. Doch nun mehren sich die Zeichen, dass es um neue Teilchen erweitert werden muss, die in hochenergetischen Reaktionen auftreten.
- Groß angelegte Experimente werden schon bald direkte Hinweise auf diese neuen Teilchen liefern. Damit tritt die Teilchenphysik nach dreißig Jahren der Konsolidierung in eine neue Phase. Zahlreiche Rätsel könnten mit einer **Erweiterung des Standardmodells** gelöst werden.
- Ein Bestandteil des Standardmodells – das **Higgs-Boson** – ist noch nicht beobachtet worden. Der Tevatron-Collider in den USA oder der Large Hadron Collider bei Cern könnten in einigen Jahren Higgs-Teilchen erzeugen und messen.

Das Standardmodell der Teilchenphysik



Die Teilchen

Die Partikel im Standardmodell reichen aus, die Alltagswelt – außer der Gravitation – und fast alle von Teilchenphysikern gesammelten Daten zu beschreiben.

Materieteilchen (Fermionen)

Im Standardmodell sind die fundamentalen Teilchen der gewöhnlichen Materie das Elektron, das Up-Quark und das Down-Quark. Quark-Tripletts bilden Protonen (zwei Ups, ein Down) und Neutronen (ein Up, zwei Downs), aus denen wiederum die Atomkerne aufgebaut sind (oben). Das Elektron und das Up- und Down-Quark bilden zusammen mit dem Elektron-Neutrino die erste von drei Teilchenfamilien. Jede Familie unterscheidet sich von den anderen nur durch die Teilchenmassen (Tabelle rechts). Die Werte für die Neutrinomassen im Diagramm sind spekulativ, aber so gewählt, dass sie mit Beobachtungen übereinstimmen.

Wechselwirkungsteilchen (Bosonen)

Das Standardmodell beschreibt drei der vier bekannten Kräfte: den Elektromagnetismus, die schwache Kraft – sie ist an der Bildung der chemischen Elemente beteiligt – und die starke Kraft, die Protonen, Neutronen und Kerne zusammenhält. Die Kräfte werden durch Wechselwirkungsteilchen vermittelt: Photonen für den Elektromagnetismus, *W*- und *Z*-Bosonen für die schwache Kraft und Gluonen für die starke Kraft. Für die Schwerkraft werden Gravitonen postuliert, doch die Gravitation ist nicht im Standardmodell enthalten. Durch das Modell werden die elektromagnetische und die schwache Kraft vereinigt: Bei hohen Energien oder bei Abständen unterhalb des Protondurchmessers verschmelzen beide zur elektroschwachen Kraft.

Ein großer Erfolg des Standardmodells ist, dass die Form der Kräfte – die Struktur der sie beschreibenden Gleichungen – nicht ad hoc an die empirischen Daten angepasst werden muss, sondern weitgehend aus allgemeinen Prinzipien folgt. Beispielsweise folgt aus der relativistischen Quantenfeldtheorie – auf der das Standardmodell beruht – und der Existenz des Elektrons, dass auch das Photon existieren muss und sich den Beobachtungen entsprechend verhält. Das heißt, wir verstehen endlich den Elektromagnetismus und das Wesen des Lichts. Ähnliche Überlegungen sagten die Existenz und die Eigenschaften der Gluonen sowie der *W*- und *Z*-Teilchen richtig voraus.

Der Ursprung der Masse

Außer den beschriebenen Teilchen sagt das Standardmodell die Existenz des Higgs-Bosons voraus, das bisher noch nicht experimentell nachgewiesen wurde. Die Wechselwirkung des Higgs mit den anderen Partikeln verleiht diesen ihre jeweilige Masse.

Tiefere Ebenen?

Könnte das Standardmodell von einer Theorie verdrängt werden, in der Quarks und Elektronen aus noch fundamentaleren Teilchen bestehen? Fast sicher nicht. Kein Experiment hat bisher einen Hinweis auf zusätzliche Strukturen geliefert. Vor allem ist das Standardmodell eine zusammenhängende Theorie, die darauf beruht, dass Elektronen und Quarks fun-

damental sind. Es gibt keine losen Enden, die auf eine tiefere Struktur hinweisen. Außerdem werden bei sehr hohen Energien alle Kräfte gleich, insbesondere sofern die Supersymmetrie zutrifft (siehe Kasten auf Seite 30). Wenn Elektronen und Quarks zusammengesetzt wären, würde diese Vereinigung misslingen: Die Kräfte würden nicht gleich groß. Die relativistische Quantenfeldtheorie betrachtet Elektronen und Quarks als punktförmig und somit strukturlos. Selbst wenn sie künftig gemäß der Stringtheorie als winzige Fäden oder Membranen beschrieben werden, bleiben sie doch Elektronen und Quarks: Sie behalten all ihre aus dem Standardmodell bei tiefen Energien bekannten Eigenschaften.

Die Spielregeln

Das Standardmodell beschreibt die fundamentalen Teilchen und die Art ihrer Wechselwirkungen. Für ein komplettes Bild müssen wir auch die Regeln kennen, mit denen sich das Ergebnis einer Wechselwirkung berechnen lässt.

Nehmen wir als Beispiel das Newton'sche Gesetz $K = mb$. Darin ist K irgendeine Kraft, m die Masse irgendeines Teilchens und b die Beschleunigung, die es durch die Kraft erfährt. Selbst wenn man alles über die Teilchen und die auf sie wirkenden Kräfte weiß, kann man das Verhalten der Teilchen nur berechnen, wenn man außerdem die Regel $K = mb$ kennt.

Die moderne Version der Regeln ist die relativistische Quantenfeldtheorie, die in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt wurde. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entstand das Standardmodell; es gab Auskunft über die Teilchen und Wechselwirkungen – sozusagen die Mitspieler, die nach den Regeln der Quantenfeldtheorie spielen.

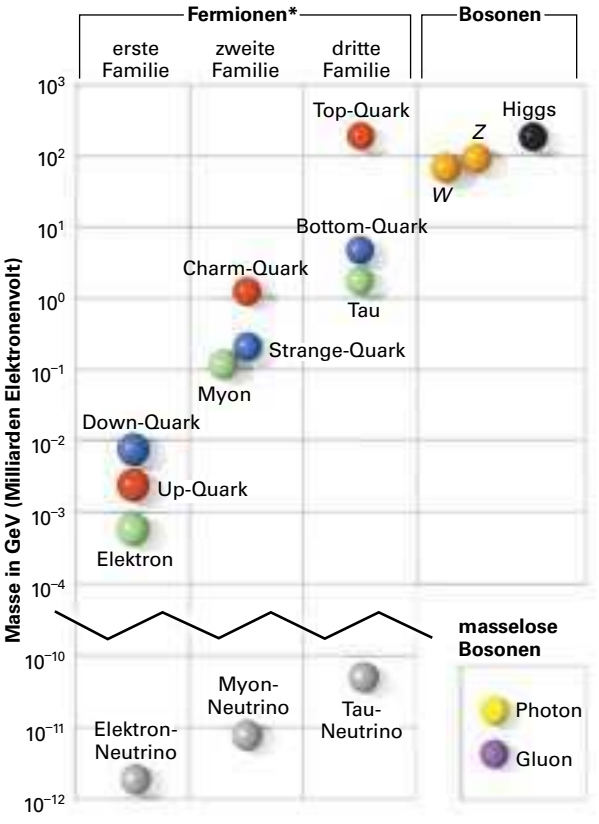
Der klassische Kraftbegriff wird durch das Standardmodell erweitert: Wenn Teilchen wechselwirken, so wirken sie auf einander nicht nur abstoßend und anziehend, sondern können auch ihre Identität wechseln und erzeugt oder zerstört werden.

Als nützliche Kürzel zur Beschreibung der Wechselwirkungen in der Quantenfeldtheorie dienen Feynman-Diagramme, benannt nach ihrem Erfinder, dem amerikanischen Physiker Richard P. Feynman (1918–1988; Nobelpreis 1965). Gerade Linien bezeichnen die Bahnen von Materieteilchen, Wellenlinien stehen für Wechselwirkungsteilchen, das heißt für die Quanten der jeweiligen Kraft.

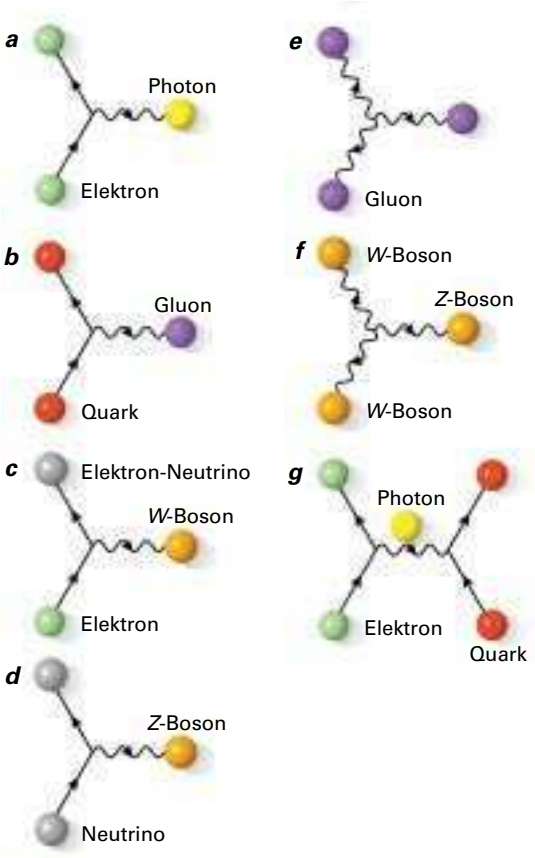
Elektromagnetismus wird erzeugt, indem ein geladenes Teilchen – etwa ein Elektron oder ein Quark – ein Photon emittiert oder absorbiert. In *a* (siehe Grafik oben) emittiert das ankommende Elektron ein Photon und bewegt sich in anderer Richtung davon.

Die starke Kraft wird über Gluonen vermittelt, die von Quarks emittiert *(b)* oder absorbiert werden. Bei der schwachen Kraft sind *W*- und *Z*-Teilchen im Spiel *(c, d)*, die sowohl von Quarks als auch von Leptonen – Elektronen, Myonen, Tau-Teilchen und Neutrinos – emittiert oder absorbiert werden. Man beachte, wie das *W*-Teilchen das Elektron zwingt, seine Identität zu ändern. Gluonen *(e)* sowie *W*- und *Z*-Teilchen *(f)* wechselwirken auch mit sich selbst, aber Photonen nicht.

Die Diagramme *a* bis *f* heißen Wechselwirkungsvertizes. Kräfte entstehen durch Kombination von zwei oder mehr Vertizes. Zum Beispiel wird die elektromagnetische Kraft zwischen einem Elektron und einem Quark großenteils durch Transfer eines Photons erzeugt (g). Alles, was in unserer Welt geschieht – mit Ausnahme der Gravitation –, ist das Resultat von Kombinationen solcher Vertizes.



*Fermionen werden unterteilt in Quarks und Leptonen. Letztere umfassen Elektronen, Myonen, Tau-Teilchen und drei Sorten Neutrinos.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

▷ eine Maschine mit 27 Kilometer Umfang, die bei Cern, dem europäischen Labor für Teilchenphysik in der Nähe von Genf, in Bau ist (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2000, S. 68). Ein dreißig Kilometer langer linearer Elektron-Positron-Collider, der die Resultate des LHC ergänzen wird, befindet sich in der Entwurfsphase.

Während sich eine Physik jenseits des Standardmodells erst in Umrissen abzeichnet, erwecken Zeitungsberichte oft den Eindruck, das Standardmodell hätte sich als falsch erwiesen, wäre zusammengebrochen und würde demnächst aufgegeben. Doch so geht es in der Physik nicht zu.

Nehmen wir als Beispiel die Maxwell'schen Gleichungen; sie wurden Ende des 19. Jahrhunderts aufgestellt, um die elektromagnetische Kraft zu beschreiben. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts stellte sich heraus, dass für atomare Größenordnungen eine Quantenversion der Maxwell'schen Gleichungen nötig ist. Heute umfasst das Standardmodell diese quantisierten Maxwell-Gleichungen als eine Untermenge seiner Gleichungen. Doch das bedeutet keineswegs, dass Maxwells Gleichungen falsch sind. Sie wurden erweitert – und sind noch immer in Gebrauch, um unzählige elektronische Geräte zu konstruieren.

Ebenso wird uns das Standardmodell erhalten bleiben. Es ist eine vollständige mathematische Theorie – ein vielfach zusammenhängendes und höchst stabiles Gebäude. Es wird sich als Teil eines noch größeren Gebäudes erweisen, aber es kann nicht »falsch« sein. Kein tragendes Element der Theorie kann versagen, ohne dass das gesamte Gebilde einstürzt. Wäre die Theorie falsch, so wären viele erfolgreiche Tests purer Zufall gewesen. Das Modell wird weiterhin starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkungen bei niedrigen Energien beschreiben.

Ein dauerhaftes Gebäude

Das Standardmodell ist sehr gut erprobt. Es sagte die Existenz der *W*- und *Z*-Bosonen voraus sowie das Gluon und zwei schwerere Quarks namens Charm- und Top-Quark. Sie alle wurden daraufhin experimentell nachgewiesen und entsprachen exakt den Vorhersagen.

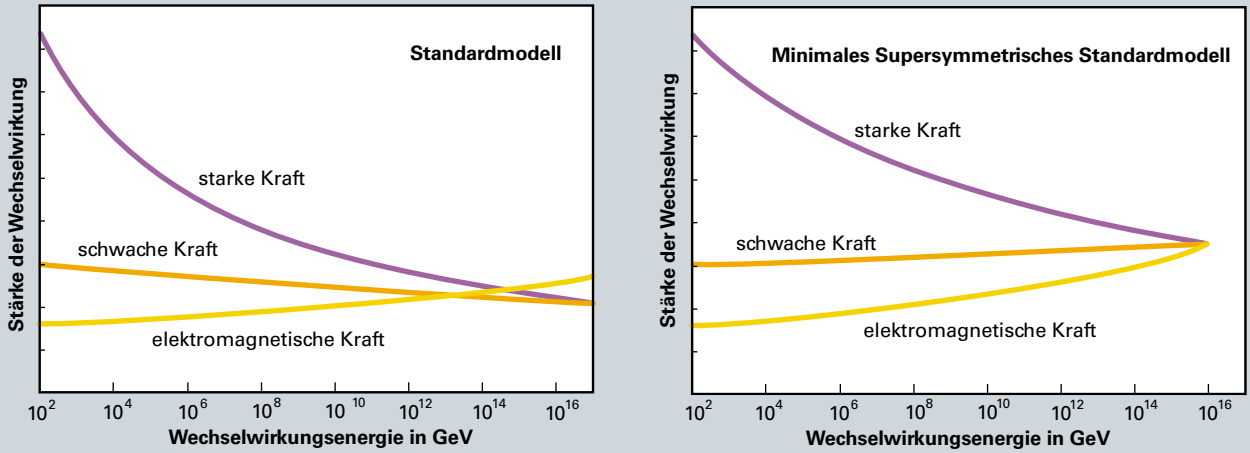
(*Anmerkung der Redaktion*: Normalerweise kombinieren sich in der Natur nur je drei Quarks zu Baryonen oder je zwei Quarks zu Mesonen. Das Standardmodell sagt aber auch Fünferkombinationen voraus. Tatsächlich wurde vor wenigen Monaten ein solches »Pentaquark« von Takashi Nakano an der Universität Osaka in Japan entdeckt. Das exotische Teilchen, das fast augenblicklich in ein Neutron und ein K-Meson zerfällt, hat exakt die theoretisch vorhergesagte Masse von 1,54 GeV.)

Ein zweiter wichtiger Test hängt mit dem elektroschwachen Mischungswinkel zusammen; dieser Parameter spielt eine Rolle bei der Beschreibung der schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkungen. Gemäß dem Standardmodell muss der Mischungswinkel für jeden elektroschwachen Prozess denselben Wert haben. Tatsächlich ist das allen Beobachtungen zufolge mit einer Genauigkeit von einem Prozent der Fall.

Drittens maß der Large Electron Positron Collider LEP bei Cern von 1989 bis 2000 rund 20 Millionen *Z*-Bosonen. Praktisch jedes einzelne zerfiel in der vom Standardmodell vorgeschriebenen Weise – sowohl bezüglich der Häufigkeit jeder Zerfallsart als auch hinsichtlich der Energien und Richtungen der Endprodukte. Diese Tests sind nur einige Beispiele für viele, die das Standardmodell samt und sonders bestätigt haben.

In all seiner Pracht enthält das Standardmodell 17 Teilchen und ungefähr

Ein Indiz für Supersymmetrie



Die allgemein favorisierte Erweiterung des Standardmodells ist das Minimale Supersymmetrische Standardmodell. In diesem Modell hat jeder bekannte Partikeltyp einen Superpartner, der mit ihm durch die Supersymmetrie zwischen Fermionen und Bosonen verknüpft ist.

Alle Teilchen lassen sich prinzipiell in zwei Gruppen einteilen: Bosonen – die Wechselwirkungsquanten – können sich unbegrenzt in einem einzigen Zustand ansammeln, während Fermionen – Materieteilchen wie Quarks und Leptonen – niemals gleichzeitig denselben Zustand besetzen. Der Superpartner eines Fermions ist immer ein Boson und umgekehrt.

Ein indirektes Indiz für Supersymmetrie liefert die Extrapolation von Kräften zu hohen Energien. Im Standardmodell konvergieren die drei Kräfte zwar, werden aber nicht genau gleich stark (links). Erst die Existenz von Superpartnern verändert die Extrapolation so, dass die Kräfte bei einer bestimmten Energie zusammentreffen (rechts) – ein Hinweis darauf, dass sie sich tatsächlich vereinigen, sofern die Supersymmetrie zutrifft.

NINA FINKEL

ebenso viele freie Parameter, etwa für die Teilchenmassen und für die Stärke der Wechselwirkungen, die so genannten Kopplungskonstanten (siehe Kasten Seite 28/29). Diese Größen können im Prinzip jeden Wert annehmen, und wir erfahren den korrekten Wert nur durch Messungen.

Gelegentlich vergleichen voreilige Kritiker die vielen Parameter des Standardmodells mit den Systemen von Epizyklen, welche die Theoretiker des Mittelalters zur Beschreibung der Planetenbahnen verwendeten. Sie meinen, das Standardmodell habe wenig Aussagekraft oder es könne durch Anpassen des einen oder anderen Parameters alles erklären.

Tatsächlich ist das Gegenteil wahr: Sobald die Massen und Kopplungskonstanten bei irgendeinem Prozess gemessen wurden, stehen sie für die gesamte Theorie und für jedes andere Experiment fest, ohne den geringsten Spielraum zu lassen. Außerdem wird die Form jeder Gleichung des Standardmodells durch die Theorie im Detail bestimmt. Jeder Parameter mit Ausnahme der Masse des Higgs-Bosons ist gemessen worden. Solange wir nicht über das Standardmodell hinausgehen, können neue Resultate unsere Kenntnis der Parameter nur noch weiter präzisieren – und damit wird es nicht einfacher, sondern schwieriger, alle experimentellen Daten unter einen Hut zu bringen, denn die gemessenen Größen müssen noch präziser übereinstimmen.

Suche nach Superpartnern

Scheinbar bringt das Erweitern des Standardmodells durch Hinzufügen weiterer Teilchen und Wechselwirkungen viel mehr Freiheit ins Spiel, aber das ist nicht unbedingt der Fall. Die derzeit favorisierte Erweiterung ist das Minimale Supersymmetrische Standardmodell (MSSM). Die Supersymmetrie weist jedem Teilchentyp einen Superpartner zu. Über deren Massen wissen wir wenig, aber ihre Wechselwirkungen sind durch die Supersymmetrie eingeschränkt. Wenn die Massen erst einmal gemessen sind, werden die Vorhersagen des MSSM sogar noch enger eingeschränkt sein als beim Standardmodell, weil die mathematischen Beziehungen der Supersymmetrie hinzukommen.

Wenn das Standardmodell so gut funktioniert, warum soll man es erweitern? Ein deutlicher Fingerzeig ergibt sich aus dem seit langem angestrebten ▷

Die Mängel des Standardmodells

Zehn Rätsel

Triftige Gründe für eine Erweiterung des Standardmodells ergeben sich aus Phänomenen, die es nicht zu erklären vermag oder die sogar mit ihm unvereinbar sind:

1. All unsere heutigen Theorien scheinen zu besagen, dass das Universum eine ungeheure Konzentration an Energie enthält – selbst in den leersten Regionen des Weltraums. Die Gravitationseffekte dieser so genannten Vakuumenergie hätten das Universum schon längst entweder eng einrollen oder noch viel mehr aufblähen müssen. Das Standardmodell vermag dieses Rätsel – das Problem der kosmologischen Konstanten – nicht zu lösen.

2. Lange glaubten die Kosmologen, die Expansion des Universums müsse sich verlangsamen, weil sie durch die gegenseitige Gravitationsanziehung der Materie gebremst wird. Erst seit kurzem wissen wir, dass die Expansion sich beschleunigt und dass die Ursache dafür – »Dunkle Energie« genannt – nicht mit der Physik der Standardmodells zu vereinbaren ist.

3. Es gibt starke Indizien für die so genannte kosmische Inflation: In den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall machte das Universum eine extrem rasche Expansion durch. Die für die Inflation verantwortlichen Felder können nicht dem Standardmodell entstammen.

4. Wenn das All mit dem Urknall, das heißt mit einem riesigen Ausbruch purer Energie begann, müsste daraus aufgrund der Ladungsparität – der Symmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen – exakt gleich viel Materie und Antimaterie entstanden sein. Doch stattdessen bestehen die Sterne und Nebel aus Protonen, Neutronen und Elektronen – und nicht aus deren Antiteilchen. Diese Asymmetrie lässt sich mit dem Standardmodell nicht erklären.

5. Rund ein Viertel des Universums besteht aus Kalter Dunkler Materie; diese unsichtbare, exotische Substanz kann nicht aus Teilchen des Standardmodells zusammengesetzt sein.

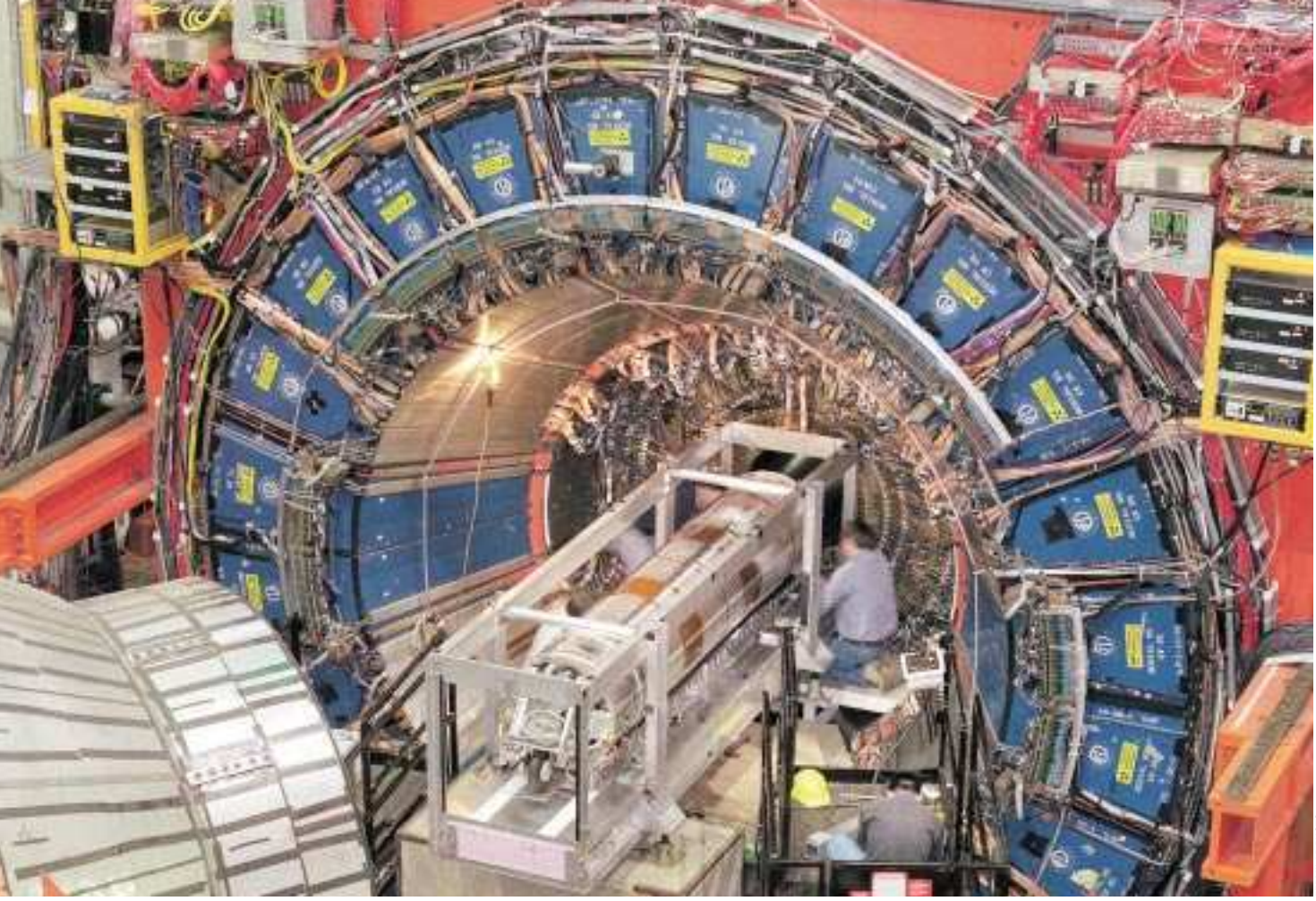
6. Im Standardmodell erwerben die Teilchen ihre Masse durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld, dessen Quanten die – noch nicht experimentell nachgewiesenen – Higgs-Bosonen sind. Das Standardmodell kann aber die eigentümliche Form dieser Higgs-Wechselwirkung nicht erklären.

7. Die quantentheoretisch berechnete Masse des Higgs-Bosons ist enorm groß. Dadurch würden aber auch die Massen aller Teilchen viel zu groß. Dieses Ergebnis lässt sich im Standardmodell nicht vermeiden und verursacht somit ein grundlegendes Problem.

8. Das Standardmodell kann die Gravitation nicht einschließen, weil sie sich von den drei anderen Kräften grundlegend unterscheidet.

9. Das Standardmodell vermag die Werte für die Massen der Quarks und der Leptonen – beispielsweise von Elektron und Neutrino – nicht zu erklären.

10. Das Standardmodell gruppiert die Teilchen in drei Familien. Die Alltagswelt besteht nur aus Partikeln der ersten Familie, und für sie scheint eine eigene geschlossene Theorie zu gelten. Das Standardmodell beschreibt alle drei Familien, vermag aber nicht zu erklären, warum es mehr als eine Familie gibt.



FERMILAB PHOTO

Die riesigen Teilchendetektoren des Tevatron-Colliders am Fermi National Laboratory in Batavia (US-Bundesstaat Illinois) sind prinzipiell in der Lage, Indizien für Supersymmetrie und Higgs-Bosonen zu sammeln.

▷ Ziel, die Naturkräfte zu vereinigen. Im Standardmodell können wir die Kräfte extrapolieren und fragen, wie sie sich bei viel höheren Energien verhalten würden. Zum Beispiel: Wie sahen die Kräfte aus, als kurz nach dem Urknall extrem hohe Temperaturen herrschten? Bei tiefen Energien ist die starke Kraft rund dreißigmal stärker als die schwache Kraft und mehr als hundertmal stärker als der Elektromagnetismus. Wenn wir extrapolieren, stellt sich heraus, dass die Stärken dieser drei Kräfte sehr ähnlich werden, aber niemals genau gleich groß. Erst wenn wir das Standardmodell zum MSSM erweitern, werden die Kräfte bei einer bestimmten hohen Energie praktisch identisch (siehe Kasten Seite 30). Es kommt noch besser: Bei etwas höherer Energie nähert sich auch die Schwerkraft derselben Stärke – ein Indiz für eine Verbindung zwischen den Kräften des Standardmodells und der Schwerkraft. Diese Resultate scheinen deutlich für das MSSM zu sprechen.

Wenn ich bei der Aufzählung der »zehn Rätsel« auf Seite 31 immer wieder sage, dass das Standardmodell ein Phänomen nicht erklären kann, meine ich damit nicht, die Theorie habe es nur noch nicht erklärt, werde das aber eines Tages zu Wege bringen. Das Standardmodell ist eine höchst eingeschränkte Theorie, und sie wird die aufgezählten Phänomene niemals erklären können.

Dennoch sind Erklärungen möglich. Ein Grund dafür, dass die supersymmetrische Erweiterung vielen Physikern gefällt, ist: Sie kann alle Rätsel bis auf das zweite und die letzten drei behandeln. Die Stringtheorie, in der die Teilchen nicht durch punktförmige Objekte dargestellt sind, sondern durch winzige eindimensionale Gebilde, behandelt die letzten drei Rätsel (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/2003, S. 24).

Urknall als Teilchenschleuder

Dass das Standardmodell nicht alle Fragen zu beantworten vermag, ist nicht weiter überraschend – jede erfolgreiche wissenschaftliche Theorie erhöht die Anzahl der gelösten Probleme, lässt aber einige ungelöst. Und obwohl mit dem besseren Verständnis neue Fragen entstehen, die vorher nicht formuliert werden konnten, nimmt die Anzahl der ungelösten grundlegenden Fragen immer weiter ab.

Aus einigen der zehn Rätsel geht ein weiteres Argument dafür hervor, dass gegenwärtig eine neue Ära der Teilchenphysik beginnt. Wie sich herausstellt, ist die Lösung vieler grundlegender kosmologischer Probleme in der Teilchenphysik zu suchen; man spricht geradezu von »Teilchenkosmologie«. Nur aus kosmologischen Untersuchungen konnten wir erfahren, dass das All aus Materie und nicht aus Antimaterie aufgebaut ist oder dass es zu rund einem Viertel aus kalter dunkler Materie besteht. Jede theoretische Erklärung muss diese Phänomene auf die Entwicklung des Universums nach dem Urknall zurückführen. Aber aus der Kosmologie allein geht nicht hervor, welche Teilchen die Kalte Dunkle Materie ausmachen, wie die Materie-Asymmetrie tatsächlich erzeugt wird oder wie die Inflation entsteht. Dafür muss die Erkenntnis der größten und der kleinsten Phänomene zusammenkommen.

Während die Physiker sich bereits all diesen über das Standardmodell hinausweisenden Rätseln zuwenden, bleibt noch ein wesentlicher Aspekt des Mo-

dells selbst zu ergänzen. Um den Leptonen, Quarks sowie den *W*- und *Z*-Bosonen eine Masse zu geben, postuliert die Theorie das Higgs-Feld, das noch nicht direkt nachgewiesen wurde.

Dieses Feld unterscheidet sich grundlegend von allen anderen. Nehmen wir, um den Unterschied zu sehen, das elektromagnetische Feld. Elektrische Ladungen sind Quellen elektromagnetischer Felder, die uns überall umgeben und beispielsweise im Radio hörbar werden. Elektromagnetische Felder transportieren Energie. Ein Raumgebiet hat seine niedrigstmögliche Energie, wenn das elektromagnetische Feld dort überall verschwindet. Das Nullfeld ist der natürliche Zustand in Abwesenheit geladener Teilchen. Überraschenderweise verlangt das Standardmodell, dass die tiefste Energie herrscht, wenn das Higgs-Feld einen bestimmten von null verschiedenen Wert hat. Infolgedessen erfüllt ein von null verschiedenes Higgs-Feld das Universum, und die Teilchen treten mit ihm in Wechselwirkung wie Menschen, die durch Wasser waten. Diese Wechselwirkung verleiht ihnen ihre träge Masse.

Das zum Higgs-Feld gehörige Quantenteilchen ist das Higgs-Boson. Im Standardmodell können wir keine Teilchenmasse aus Grundprinzipien ableiten – auch nicht die Masse des Higgs-Bosons selbst. Jedoch lassen sich einige Massen, so die des *W*- und *Z*-Bosons und des Top-Quarks, aus anderen gemessenen Größen berechnen. Diese Voraussagen haben sich bestätigt und stützen die zugrunde liegende Higgs-Physik.

Die Physiker wissen bereits einiges über die Higgs-Masse. In Experimenten mit dem LEP-Collider wurden rund zwanzig Größen gemessen, die das Standardmodell miteinander in Beziehung setzt. Alle zur Berechnung dieser Größen erforderlichen Parameter sind bereits bekannt – mit Ausnahme der Masse des Higgs-Bosons. Man kann daher von den Daten zurückschließen und fragen, welche Higgs-Masse am besten zu den zwanzig Größen passt. Die Antwort lautet, dass die Higgs-Masse weniger als 200 Giga-Elektronenvolt (GeV, Milliarden Elektronenvolt) betragen muss. Zum Vergleich: Die Masse des Protons ist rund 0,9 GeV, die des Top-Quarks 174 GeV. Dass es überhaupt eine Antwort gibt, ist ein starkes Indiz für die Existenz des Higgs. Andernfalls müssten die zwanzig Größen aufgrund eines bemerkenswerten Zufalls just so zusammenhängen, dass sie zu einer bestimmten Higgs-Masse passen. Unser Vertrauen in diese Vorgehensweise ist berechtigt, denn ganz ähnlich wurde die Masse des Top-Quarks exakt vorhergesagt, bevor ein einziges dieser Teilchen direkt nachgewiesen werden konnte.

Die LEP-Forscher suchten auch nach den Higgs-Teilchen selbst, konnten aber dabei nur eine Masse bis maximal 115 GeV finden. An dieser Obergrenze der mit LEP erreichbaren Energien traten bei einigen wenigen Ereignissen Teilchen auf, die sich wie Higgs-Bosonen verhielten. Doch die Daten waren zu spärlich für einen sicheren Nachweis. Alles in allem sprechen die Resultate für eine Higgs-Masse zwischen 115 und 200 GeV.

Der Large Hadron Collider – eine Higgs-Fabrik

LEP ist unterdessen demontiert worden, um dem Bau des LHC Platz zu machen, der in vier Jahren mit dem Datensammeln beginnen soll. Bis dahin geht die Suche nach Higgs-Teilchen am Tevatron des Fermilab weiter. Falls das Tevatron die geplante Intensität und Energie erreicht und nicht durch technische oder finanzielle Schwierigkeiten Betriebszeit verliert, könnte es in zwei bis drei Jahren ein 115-GeV-Higgs bestätigen. Wenn das Higgs-Boson schwerer ist, wird es länger dauern, ein klares Signal aus dem Hintergrund zu filtern. Das Tevatron wird, wenn alles läuft wie geplant, insgesamt mehr als 10 000 Higgs-Bosonen produzieren, und es könnte untersuchen, ob sie sich verhalten wie vom Modell vorhergesagt. Der LHC wird sogar eine regelrechte Higgs-Fabrik sein, die ausgiebige Studien an Millionen dieser Teilchen ermöglicht.

Manches spricht dafür, dass auch einige der vom MSSM vorgesehenen Superpartnerteilchen genügend kleine Massen haben, um vom Tevatron produziert zu werden. Schon in den nächsten Jahren könnte sich die Supersymmetrie auf diese Weise direkt bestätigen. Der leichteste Superpartner gilt als Hauptkandidat für die Kalte Dunkle Materie im Universum; er könnte im Tevatron zum ersten Mal beobachtet werden. Doch erst der LHC wird Superpartner – falls sie existieren – in großen Mengen erzeugen und eindeutig klären, ob die Natur tatsächlich supersymmetrisch ist.

Um das Verhältnis des Standardmodells zur übrigen Physik sowie seine Stärken und Schwächen ganz zu erfassen, ist es nützlich, den Begriff der effektiven Theorien einzuführen. Eine effektive Theorie ist eine Beschreibung eines Aspekts der Natur, deren Eingabedaten – zumindest im Prinzip – mithilfe einer tiefer liegenden Theorie berechenbar sind. In der Kernphysik zum Beispiel dienen Masse, Ladung und Spin des Protons als Eingabedaten. Im Standardmodell lassen sich diese Größen ausrechnen, indem man die Eigenschaften der Quarks und Gluonen als Eingabedaten verwendet. Die Kernphysik ist eine effektive Theorie der Atomkerne, während das Standardmodell die effektive Theorie der Quarks und Gluonen ist.

So gesehen ist jede effektive Theorie unabgeschlossen und gleichermaßen fundamental – das heißt, eigentlich überhaupt nicht fundamental. Wird die Stufenleiter der effektiven Theorien sich fortsetzen? Das MSSM löst einige Probleme, die das Standardmodell nicht löst, aber es ist wiederum eine effektive Theorie, denn es hat seinerseits Eingabedaten. Diese wiederum sind vielleicht in der Stringtheorie berechenbar.

Selbst vom Standpunkt effektiver Theorien hat die Teilchenphysik möglicherweise einen Sonderstatus. Sie könnte unser Naturverständnis so weit voranbringen, dass die Theorie ohne Eingabedaten formuliert werden kann. Mit der Stringtheorie oder einer ihrer Verwandten lassen sich vielleicht sämtliche Inputs berechnen – nicht nur die Elektronmasse und ähnliche Größen, sondern auch die Struktur der Raumzeit und die Regeln der Quantentheorie. Doch von diesem Ziel sind wir noch eine oder zwei effektive Theorien weit entfernt. ◁

Gordon Kane ist Professor für Physik an der University of Michigan in Ann Arbor. Er erforscht die Theorie des Higgs-Bosons und die supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Supersymmetry: Unveiling the Ultimate Laws of Nature. Von Gordon Kane. Perseus Publishing, 2001.

The Little Book of the Big Bang: A Cosmic Primer. Von Craig J. Hogan. Copernicus Books, 1998.

The Rise of the Standard Model: A History of Particle Physics from 1964 to 1979. Von Lillian Hoddeson et al. (Hg.). Cambridge University Press, 1997.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PALÄONTOLOGIE

Das Monster von Eislingen

Etwa eine Tonne bringt das Skelett des Ichthyosauriers auf die Waage, das Paläontologen vom Naturkundemuseum Stuttgart kürzlich bei Grabungen in der Nähe von Eislingen entdeckten. Bei einer Gesamtlänge von sieben Metern misst allein der Kopf fast 1,5 Meter. Das 185 Millionen Jahre alte Fossil gehört zur Gattung *Temnodontosaurus* (Schnittzahnsaurier), den größten bekannten Räubern im schwäbischen Jurameer. Vor allem der außergewöhnlich gut erhaltene Schädel macht es zu einer Rarität. Um ihn und die Wirbelsäule bei der Bergung nicht zu beschädigen, gossen der Saurierexperte Rainer Schoch und sein Grabungsteam das teilweise freigelegte Skelett mit Gips aus, bevor sie es völlig aus dem umgebenden Gestein herauslösten. Bisher ist nicht viel mehr über den Schnittzahnsaurier bekannt, als dass er sich von kleinen Reptilien und Fischen ernährte. Nun wollen die Forscher mehr über Anatomie und Lebensgewohnheiten des Tieres herausfinden. Das präparierte Skelett soll dann im Naturkundemuseum Stuttgart ausgestellt werden. *(Universität Tübingen, 22.7.2003)*

▼ Der Schädel des bei Eislingen ausgegrabenen Fischsauriers ist besonders gut erhalten.

DPA

ASTRONOMIE

Ältester Planet

NOAO / AURA / NSF

NASA UND H. RICHER, UNIVERSITÄT VON BRITISH COLUMBIA

▲ Im Kugelsternhaufen M 4 kreisen der Überrest einer uralten Sonne (Pfeil) und ihr ehemaliger Planet um einen Pulsar (beide unsichtbar).

Der Kugelsternhaufen M 4 im Sternbild Schwan entstand nur etwa eine Milliarde Jahre nach dem Urknall. Nun glauben Forscher dort einen genauso alten Planeten nachgewiesen zu haben. Er bewegt sich im Schwerefeld eines 1988 entdeckten, 5600 Lichtjahre von der Erde entfernten Pulsars. Dieser rasch rotierende Neutronenstern sendet einen Strahlungskegel im Radiobereich aus, der hundertmal pro Sekunde die Erde überstreicht. Schwankungen in der Pulsperiode hatten schon früh gezeigt, dass zwei andere, unsichtbare Objekte an dem Pulsar zerren. Das eine musste wegen seiner relativ großen Masse ein Weißer Zwerg sein: der ausgebrannte Überrest eines Sterns ähnlich der Sonne. Die Natur des anderen Körpers blieb zunächst unklar. Jetzt konnten Forscher um Steinn Sigurdsson von der Pennsylvania State University in Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops den Weißen Zwerg ausmachen und seine Masse bestimmen. Das erlaubte auch Rückschlüsse auf das rätselhafte dritte Objekt. Demnach handelt es sich um einen Planeten mit ungefähr der 2,5-fachen Jupitermasse, der die beiden Sterne einmal in etwa hundert Jahren umrundet. Er ist fast dreimal so alt wie das Sonnensystem und zeigt damit, dass Planeten schon viel früher entstanden – und damit vermutlich häufiger – sind als bisher gedacht. *(Science, 11.7.2003, S. 193).*

ARCHÄOLOGIE

4000 Jahre alte Felskunst in Australien

Eine Felswand im ostaustralischen Wollemi-Nationalpark ist mit über 200 Malereien verziert, von denen die ältesten vermutlich vor 4000 Jahren entstanden. Sie stellen auf bis zu zwölf übereinander aufgebrachten Pigmentschichten Waffen, Fabelwesen, Menschen und Tiere wie Adler, Echsen und Beuteltiere dar. Obwohl der Ort zu Fuß nur schwer erreichbar ist, haben ihn Generationen von Aborigines über vier Jahrtausende hinweg immer wieder aufgesucht und die teils symbolischen, teils realistischen Bilder gemalt, gezeichnet oder geritzt. Das Alter der jüngsten Darstellungen wird auf knapp 200 Jahre geschätzt. Schon 1995 entdeckte ein Wanderer die zwölf Meter lange überhängende Felswand, aber erst in diesem Jahr konnten fachkundige Wissenschaftler des Australischen Museums in Sydney unter Leitung von Paul Taçon die Malereien genauer untersuchen. Sie gelten als bedeutendster Fund von Aborigine-Kunst in den letzten fünfzig Jahren. *(Australian Museum, Juli 2003)*

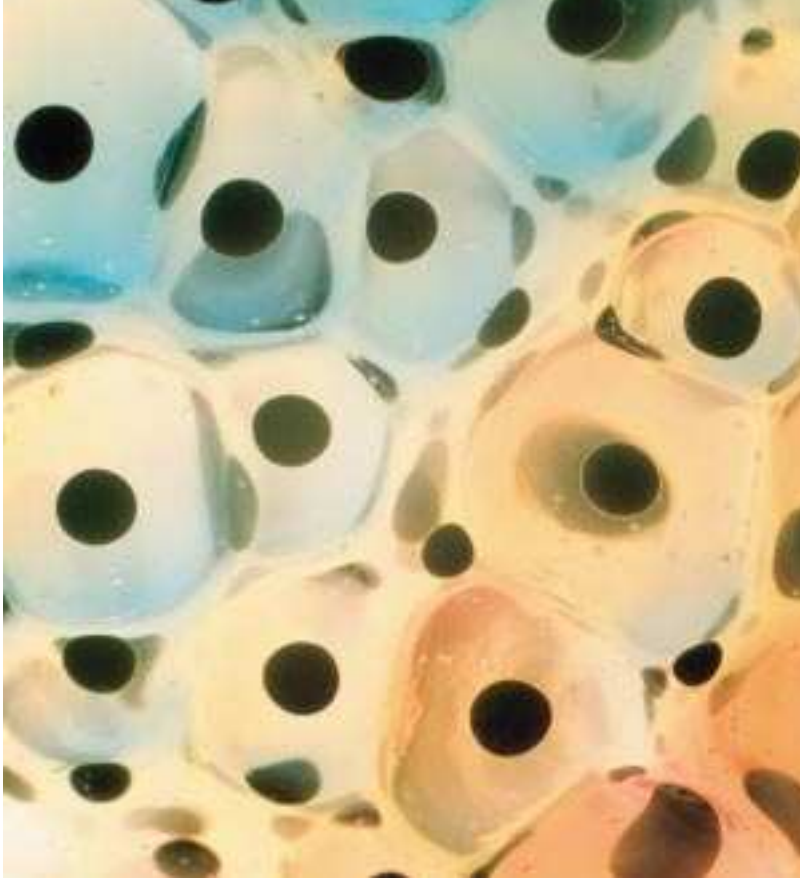
DPA

▶ Die Felswand schmückt auch ein Wombat, das in australischen Höhlenmalereien nur selten vorkommt.

MEDIZIN

Froscheier machen jung

Einen ungewöhnlichen Jungbrunnen haben John Gurdon und seine Kollegen an der Universität Cambridge entdeckt. Sie brachten die Erbsubstanz von weißen Blutkörperchen ausgewachsener Menschen in den Zellkern unreifer Eizellen des Krallenfrosches *Xenopus laevis*. Dort erschienen daraufhin nach zwei Tagen Moleküle, wie sie typischerweise in menschlichen embryonalen Stammzellen vorkommen. Solche Zellen sind neuerdings heiß begehrt, weil sie sich noch nicht auf eine bestimmte Aufgabe spezialisiert haben, sodass man im Prinzip beliebige Organe oder Gewebe daraus züchten kann. Bislang lassen sie sich nur aus frühen Embryonen gewinnen, was ethisch problematisch ist. Gurdon und seine Mitarbeiter hoffen nun, jene Moleküle in den Froscheiern identifizieren zu können, welche die Umprogrammierung der eingebrachten menschlichen Erbsubstanz vom Spezialisten- in den Generalisten-Status bewirken. Mit ihrer Hilfe ließen sich dann nach Belieben Haut- oder Blutzellen in den Alleskönner-Urzustand kurz nach der Zeugung zurückversetzen. Und daraus könnte man beispielsweise wieder Nervenzellen wachsen lassen, die zerstörtes Gewebe bei degenerativen Erkrankungen wie Parkinson-Syndrom oder Multipler Sklerose ersetzen. Ist der Patient selbst der Spender, werden die Zellen von seinem Immunsystem toleriert. *(Current Biology 13, 15.7.2003, S. 1206)*



JEREMY BURGESS / AG. FOCUS / SPL

Froscheier beherrschen die Kunst, Erbsubstanz aus Zellen erwachsener Menschen wieder in den embryonalen Urzustand zu versetzen.

MIKROBIOLOGIE

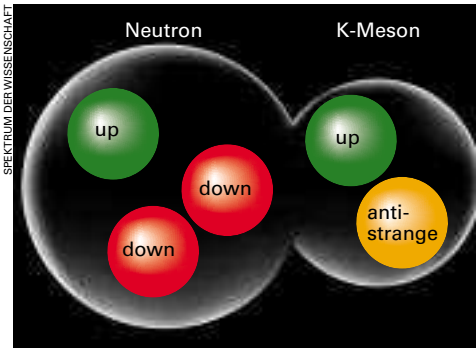
Wenn der Gejagte zum Jäger wird

Um ihren Fressfeinden zu entgehen, stellt die Alge *Prymnesium parvum* einfach die Nahrungskette auf den Kopf. Fotosynthese betreibende Primärproduzenten wie sie werden normalerweise von tierischen Einzellern oder anderen Räubern verspeist. *Prymnesium* dreht den Spieß jedoch um: Sie produziert zeitweise ein Gift, das die Zellmembran angreifender Einzeller zerstört und sogar Fische töten kann. Zum einen eliminiert sie so ihre Feinde, zum anderen verschafft sie sich damit eine zusätzliche Nahrungsquelle. Wissenschaftler um Urban Tillmann am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven konnten zeigen, dass die Alge Geißeltierchen der Art *Oxyrrhis marina* nicht nur mit ihrem Gift tötet, sondern die Überreste auch verzehrt. Mit dieser Zusatznahrung und unbehelligt von Fressfeinden explodiert dann ihre Population. Obwohl noch nicht endgültig geklärt ist, wann und unter welchen Umständen *Prymnesium* das Gift produziert, sehen die Forscher einen Zusammenhang mit den gefürchteten Algenblüten. *(Alfred-Wegener-Institut, 9.7.2003)*

PHYSIK

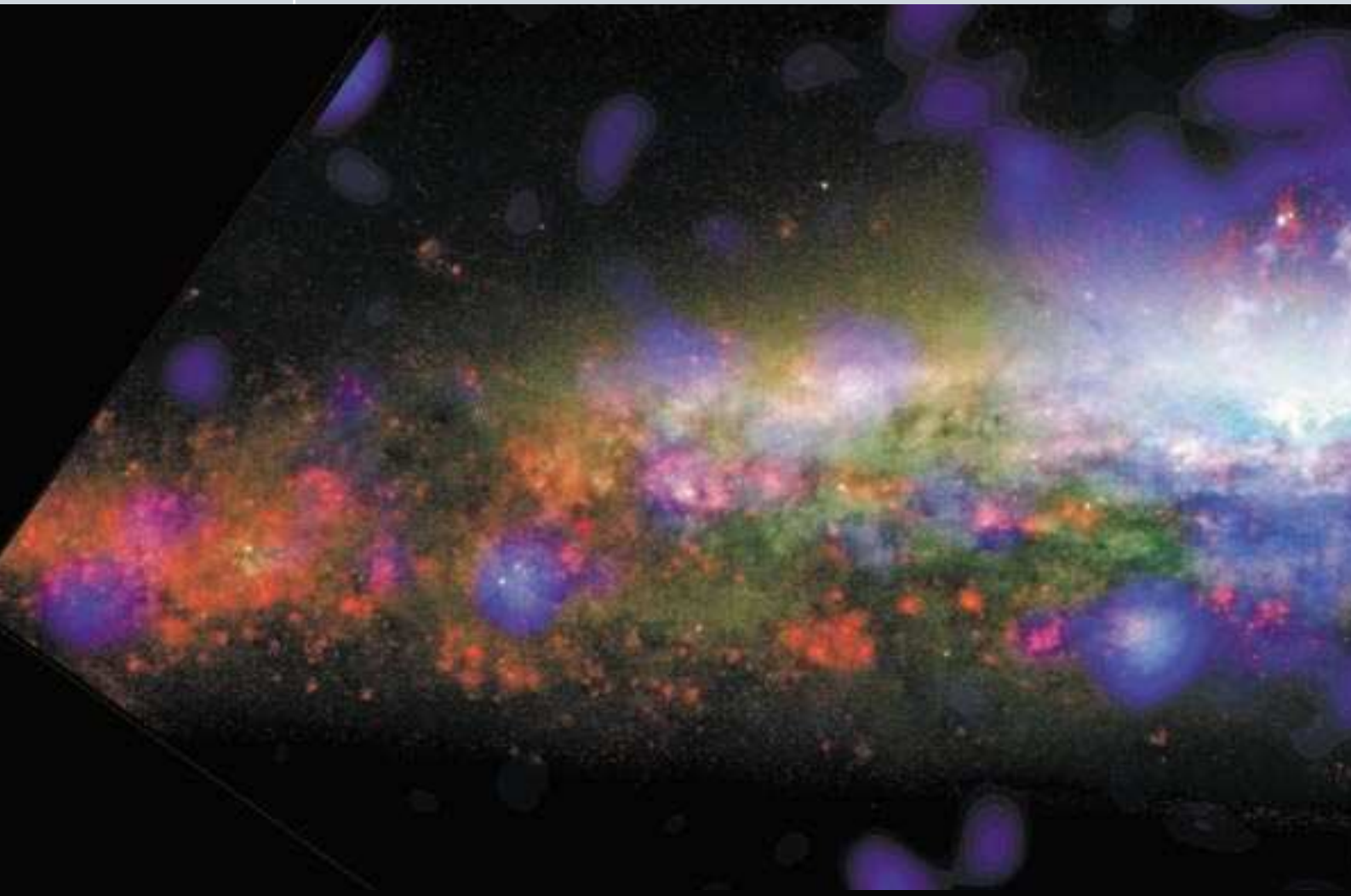
Quarks im Fünferpack

Bisher kannte man sie nur als Trios und Duos. Im Dreierverbund bilden Quarks die Bestandteile aller Atomkerne – Protonen und Neutronen – und in Paarform kommen sie als kurzlebige Zwischenprodukte vor, die Mesonen genannt werden. Nun aber gibt es auch Hinweise auf die Existenz eines Quintetts. Im Grunde ist das nicht einmal eine Überraschung: Das gängige Teilchenmodell schließt ein solches Pentaquark keineswegs aus; schon 1997 berechneten deutsche und russische Theoretiker seine mutmaßlichen Eigenschaften. Erstmals hat jetzt ein Team um Takashi Nakano am SPring-8-Synchrotron in Harima bei Kobe das hypothetische Teilchen kurzzeitig in die Wirklichkeit geholt. Die Forscher beschossen einen Graphitblock mit Gammastrahlen und stellten bei der Analyse der Reaktionsprodukte fest, dass vereinzelt Neutronen im Kohlenstoffkern mit vorübergehend gebildeten K-Mesonen verschmolzen sein mussten, bevor sie nach 10^{-20} Sekunden wieder auseinander stoben. Die gefundene Masse von 1,45 Gigaelektronenvolt stimmt sehr gut mit den theoretischen Erwartungen für ein Pentaquark überein. Unterdessen haben mehrere Forschergruppen bei anderen Experimenten das Resultat bestätigt, darunter Wissenschaftler am Physikalischen Institut in Bonn. *(Physical Review Letters, 3.7.2003, S. 012002)*



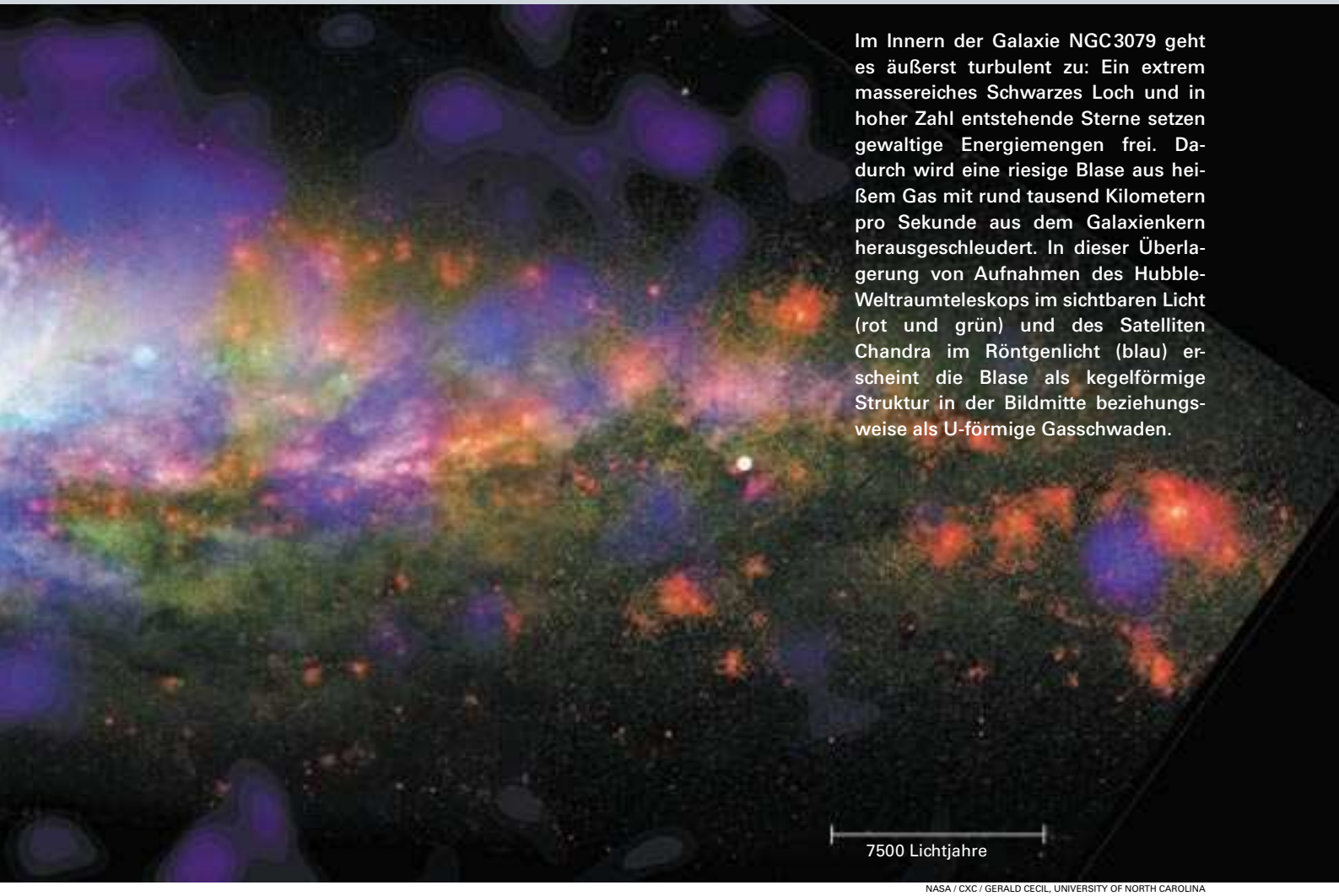
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Hypothetische Struktur des neu entdeckten Pentaquarks



Galaxien im Ausnahmezustand

Sie sind grundverschieden und treten doch häufig gemeinsam auf: einerseits massereiche Schwarze Löcher im Herzen aktiver Galaxien, andererseits hell leuchtende Gebiete mit besonders hoher Geburtenrate von Sternen. Dies ist offenbar kein Zufall. Astronomen erkunden, was beide Phänomene verbindet.



Im Innern der Galaxie NGC 3079 geht es äußerst turbulent zu: Ein extrem massereiches Schwarzes Loch und in hoher Zahl entstehende Sterne setzen gewaltige Energiemengen frei. Dadurch wird eine riesige Blase aus heißem Gas mit rund tausend Kilometern pro Sekunde aus dem Galaxienkern herausgeschleudert. In dieser Überlagerung von Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops im sichtbaren Licht (rot und grün) und des Satelliten Chandra im Röntgenlicht (blau) erscheint die Blase als kegelförmige Struktur in der Bildmitte beziehungsweise als U-förmige Gasschwaden.

NASA / CXC / GERALD CECIL, UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA

Von Kimberly Weaver

Fast jede große Galaxie birgt in ihrem Kern ein massereiches Schwarzes Loch. Diese zentralen Schwerkraftmonster sind gewissermaßen die effektivsten Müllschlucker des Universums. Alle materiellen Gegenstände, die dem Höllenschlund zu nahe kommen, werden durch die enormen Gezeitenkräfte zerrissen und verschwinden darin auf Nimmerwiedersehen. Selbst Licht vermag der Falle nicht zu entrinnen. Deshalb kann keinerlei Information von dem sonderbaren Himmelskörper nach außen gelangen. Es ist, als wiese unser All an diesem Punkt eine Fehlstelle auf, die sich nur durch ihre Gravitation bemerkbar machte und durch sonst nichts.

Das Schwarze Loch verrät sich nur indirekt. Wenn es Materie aufsaugt, strömt diese nicht geradlinig hinein, sondert nähert sich ihm in immer enger werdenden Spiralbahnen. Dadurch bildet sich eine so genannte Akkretionsscheibe um das Loch aus, in der die Materie herumgewirbelt wird. Reibung innerhalb dieses Mahlstroms erhitzt die Scheibe auf mehrere Millionen Grad, sodass sie intensive Wärmestrahlung aussendet. Unter dem Einfluss eines Magnetfelds kann ein kleiner Teil der Materie dem alles aufsaugenden Gravitationsstrudel entgehen und bildet stattdessen ein Paar fast lichtschneller Teilchenstrahlen, die beiderseits der Scheibe aus ihr herausschießen. All dies ist ein Kennzeichen besonderer Aktivität im Zentrum einer Galaxie, weshalb die Astronomen derartige Objekte als aktive Galaxienkerne bezeichnen.

Schwarze Löcher als Geburtshelfer für Sterne?

Auch wenn Schwarze Löcher die Masse von Abermillionen Sternen in sich vereinen können, so umfassen sie doch üblicherweise nicht mehr als ein Prozent der Gesamtmasse ihrer umgebenden Galaxie. Ihr zerstörerischer Einfluss ist deshalb nur auf ihre unmittelbare Umgebung beschränkt. Von ihrer enormen Schwerkraft ist in den meisten Regionen des Sternsystems kaum etwas zu spüren. Darum hielten es die Astronomen lange Zeit für ausgeschlossen, dass die zentralen Schwarzen Löcher die Vorgänge im Außenbereich der Galaxie beeinflussen könnten, wie etwa die Bildung neuer Sterne.

Doch in den letzten zehn Jahren mussten die Wissenschaftler erstaunt feststellen, dass die zentrale Aktivität einer Galaxie häufig mit einer stark erhöhten Sternbildung, einem so genannten Starburst, weiter außen einhergeht. Diese Koinzidenz von aktiven Kernen und übersteigerter Sternentstehung ist heute ein bewegtes Forschungsfeld. Faszinierende Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops zeigen die verschiedenen Vorgänge im Detail. Beobachtungen des Röntgensatelliten Chandra offenbaren, was für das Hubble-Teleskop nicht sichtbar ist. Und die Forscher wollen nicht nur die Vorgänge in den untersuchten Galaxien verstehen, sondern einige der größten Rätsel der modernen Astrophysik lösen: Wie verlief im jungen Univer- ▷

IN KÜRZE

▶ Galaxien weisen zwei Arten von Aktivität auf, deren Energiefreisetzung alle anderen Phänomene im Universum in den Schatten stellt: **Aktive Galaxienkerne** sind sehr kompakte Strahlungsgebiete, bei denen vermutlich Materie in ein extrem massereiches Schwarzes Loch fällt. **Starbursts** sind Zonen, in denen pro Zeiteinheit rund tausendmal mehr Sterne entstehen als normalerweise.

▶ Beide Phänomene seien **unabhängig** voneinander, glaubte man lange, zumal sie sich oft in weit entfernten Gegenden einer Galaxie abspielen. Doch nach und nach häuften sich die **Indizien für einen Zusammenhang**.

▶ Verursachen Starbursts aktive Kerne, oder ist der kausale Zusammenhang umgekehrt? Oder gibt es einen **dritten Prozess**, der die beiden anderen nach sich zieht? Diese Fragen haben große Bedeutung für unser Verständnis der Galaxienentwicklung.

▷ sum die erste Phase der Sternbildung? Spielten dabei extrem massereiche Schwarze Löcher eine Rolle? Wann und wie schnell bildeten sich diese Schwerkraftmonster?

Die punktförmig erscheinenden aktiven Galaxienkerne und die über weite Regionen ausgedehnten Starbursts gehören zu den spektakulärsten Phänomenen im Universum. Zu den hellsten aktiven Kernen zählen die Quasare; sie können die milliarden- bis billionenfache Leuchtkraft der Sonne haben und somit auf astronomischen Aufnahmen das Sternlicht ihrer Galaxien völlig überstrahlen. Als Energiequelle der Quasare und anderer Typen von aktiven Galaxienkernen vermuten die Forscher Schwarze Löcher mit dem Millionen- bis Milliardenfachen der Sonnenmasse. Die gewaltige Strahlungsleistung dieser Objekte entsteht im inneren Bereich der Akkretionsscheibe, der kleiner ist als unser Sonnensystem. Neben energiereicher Gamma- und Röntgenstrahlung setzen die aktiven Galaxienkerne auch alle Formen langwelligerer elektromagnetischer Strahlung frei: ultraviolettes, sichtbares und infrarotes Licht sowie Radiostrahlung.

Auch die Starburst-Galaxien können eine enorme Leuchtkraft aufweisen. In ihnen entstehen jährlich bis zu tausend neue Sterne, während normale Galaxien wie unser Milchstraßensystem im Mittel nur einen neuen Stern pro Jahr hervorbringen. Manchmal ist der Starburst auf eine nur wenige hundert Lichtjahre große Region – meist nahe dem Zentrum der Galaxie – beschränkt; in anderen Fällen erstreckt er sich über Zehntausende von Lichtjahren. Häufig finden sich solche verstärkten Sternentstehungsprozesse in Paaren oder Gruppen von Galaxien, die sich mit ihrer Schwerkraft wechselseitig beeinflussen, miteinander verschmelzen oder einem solchen Vorgang kürzlich ausgesetzt waren. Die dabei wirkenden Gezeitenkräfte durchmischen das interstellare Gas und führen einen Teil davon den Galaxienzentren zu. Die Störung des Gasgefüges begünstigt in einigen Regionen den gravitativen Kollaps von Gaswolken und leitet so die Bildung neuer Sterne ein. Dieser Prozess dauert rund 10 Millionen Jahre, dann ist der Vorrat an instabilem Gas aufgebraucht.

Ein fundamentaler Zusammenhang?

Auch Starburst-Galaxien leuchten in einem weiten Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Einerseits erstrahlen massereiche junge Sterne im ultravioletten und sichtbaren Licht. Andererseits haben Starbursts eine besonders hohe Infrarotleuchtkraft, hervorgerufen durch den in den Gaswolken vorhandenen Staub, der das Sternlicht zum Teil absorbiert und die Energie als infrarote Wärmestrahlung wieder abgibt.

Zudem emittieren die Sternentstehungsregionen auch intensive Röntgenstrahlung, deren Quelle vorwiegend die Explosionswolken von Supernovae sind. Die massereichsten Sterne haben nämlich eine so geringe Lebensdauer, dass sie bereits ausgebrannt sind und explodieren, während in der Umgebung die Sternentstehung noch nicht abgeschlossen ist. Auch die kompakten Überreste der Explosionen – Neutronensterne und stellare Schwarze Löcher – emittieren Röntgenstrahlung, wenn sie zum Beispiel Gas von einem Begleitstern absaugen.

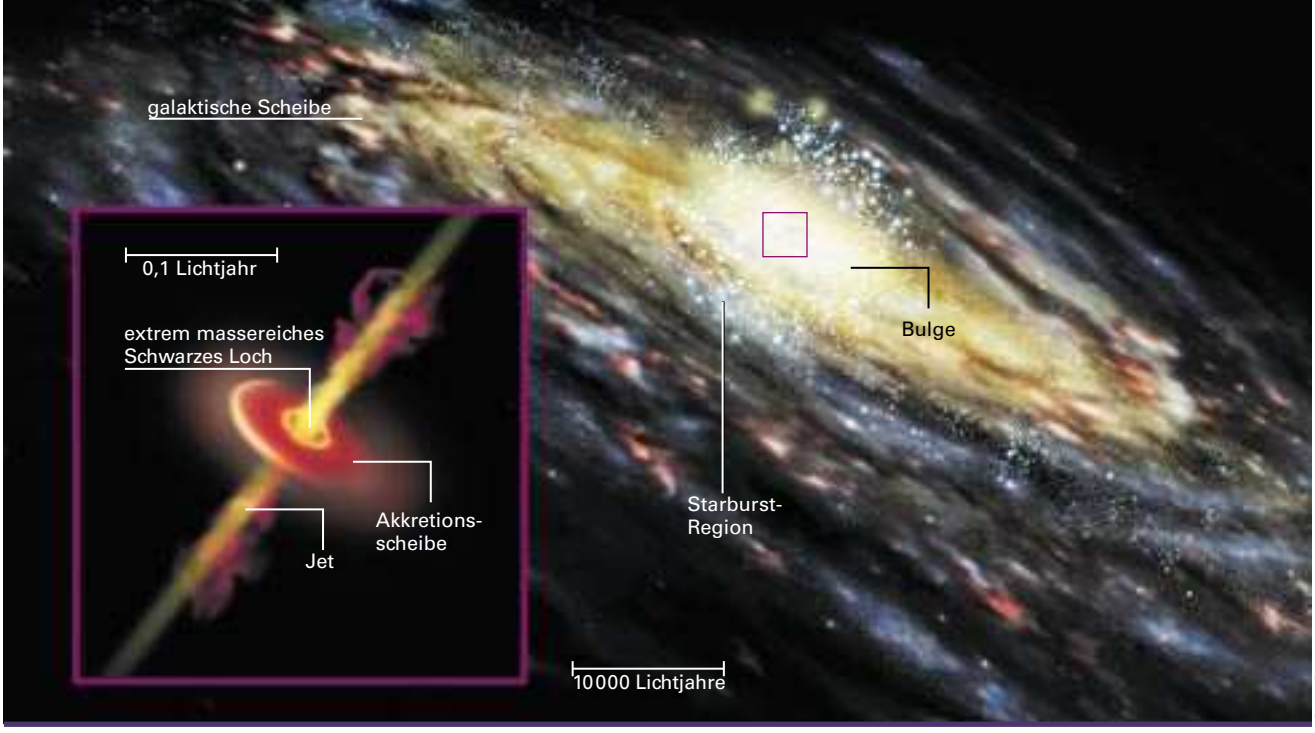
Der Gedanke, es könnte irgendwie eine Verbindung zwischen Starbursts und aktiven Galaxienkernen geben, hat sich allmählich entwickelt. Er wurde das erste Mal vor 15 Jahren geäußert, als man noch über die Energiequelle der aktiven Kerne rätselte. Damals vermutete ein Forscherteam, dem Roberto Terlevich von der Universität Cambridge und Jorge Melnick von der Europäischen Südsternwarte angehörten, bei den aktiven Galaxienkernen könnte es sich um kompakte Starburst-Regionen handeln. Diese Idee war durchaus mit den damaligen Beobachtungsdaten verträglich.

Erst Ende der 1980er Jahre war das Auflösungsvermögen der Teleskope für die verschiedenen Spektralbereiche gut genug, um feststellen zu können, wie kompakt aktive Galaxienkerne tatsächlich sind. Zudem zeigte sich, dass einige dieser Kerne ihre Leuchtkraft binnen weniger Stunden in erheblichem Maße verändern. Der Durchmesser der emittierenden Gebiete kann demnach höchstens einige Lichtstunden betragen. Dies entspricht der Größe von Planetensystemen, aber nicht den Ausdehnungen von Sternentstehungsregionen, die sich nach Lichtjahren bemessen – ein Hinweis auf ein Schwarzes Loch.

Wenn ein Sternhaufen ein solch kleines Volumen hätte, würden die Sterne so häufig kollidieren, dass durch aufeinander folgende Verschmelzungen ohnehin ein massereiches Schwarzes Loch entstünde, wie es für einen aktiven Galaxienkern typisch ist. Außerdem zeigen einige aktive Kerne – zumeist beobachtet durch hochauflösende Radiointerferometer – so genannte Jets, stark gebün-

Anatomie einer Galaxie

Eine typische Spiralgalaxie enthält rund 100 Milliarden Sterne, die meisten von ihnen in einer flachen Scheibe. Um das Zentrum, in dem gewöhnlich ein extrem massereiches Schwarzes Loch sitzt, wölbt sich ein eher kugelförmiger Bereich aus Sternen, der so genannte Bulge. Wenn Gas in das Loch strömt, formt es zunächst eine Akkretionsscheibe; ein Teil des Gases wird senkrecht dazu in gegenläufigen Strahlen (Jets) weggeschleudert. In Starburst-Regionen entstehen neue Sterne mit ungewöhnlich hoher Rate. Beide Aktivitätsphänomene hängen offenbar eng miteinander zusammen.



delte Plasmastrahlen, die beidseitig aus dem Kern herausschießen. Solche Jets lassen sich durch Starbursts nicht erklären, wohl aber waren sie für aktive Galaxienkerne bereits vorhergesagt worden (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/1991, S. 98).

Zwar stellten sich also aktive Galaxienkerne und Starbursts als unterschiedliche Prozesse heraus, doch gehen sie in vielen konkreten Fällen miteinander einher, sodass eine ursächliche Verbindung anzunehmen ist (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1996, S. 48).

Was die Beobachtungen verraten

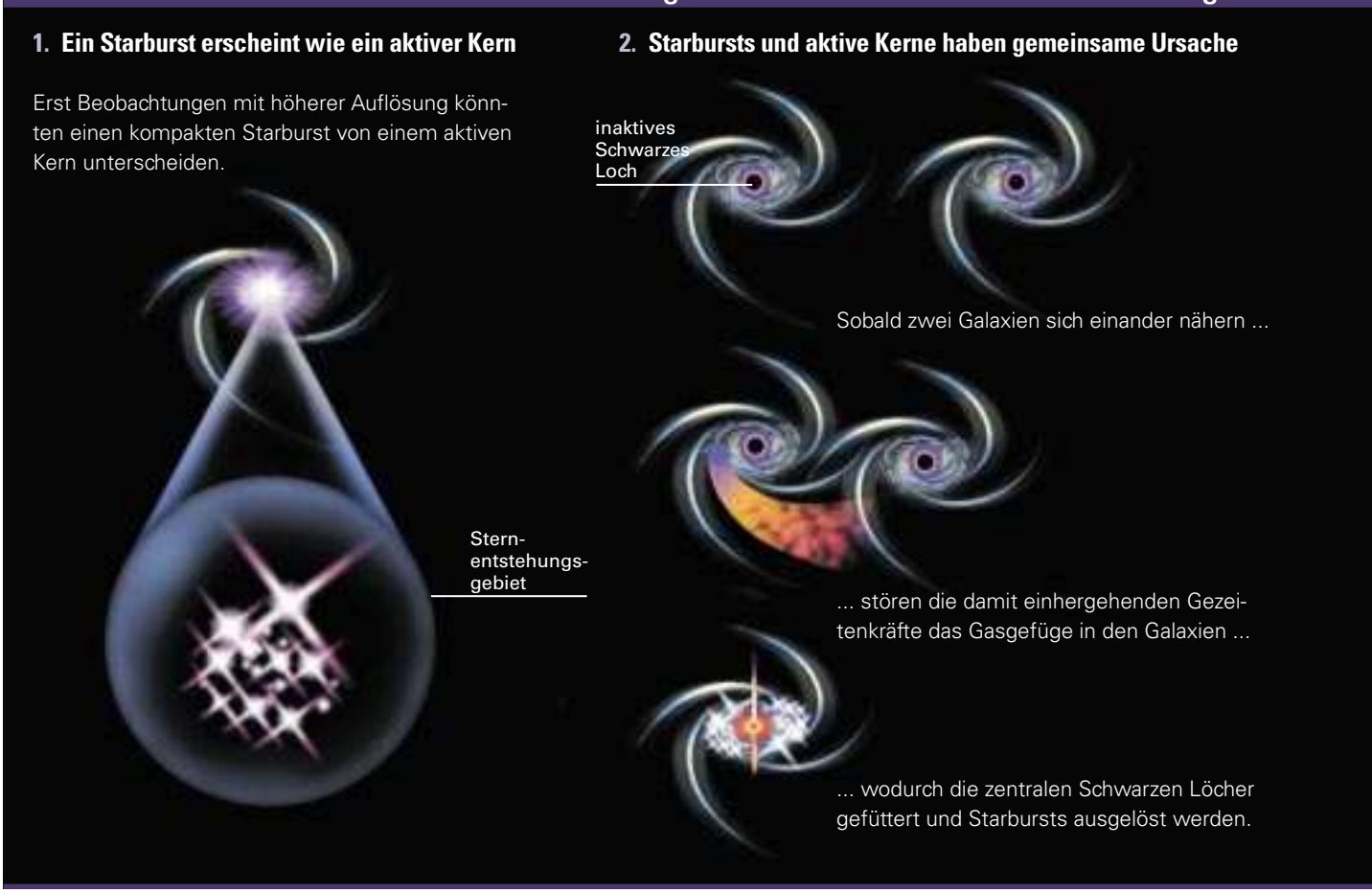
Mehrere Beobachtungsbefunde lassen vermuten, dass es sich um ein Prinzip mit fundamentaler Bedeutung für die Entwicklung des Universums handelt:

Zunächst zeigen Aufnahmen naher Galaxien aktive Kerne und Starbursts direkt nebeneinander. Solche Beobachtungen sind recht knifflig, da der Blick auf die Kernregionen durch Gas und Staub behindert wird. Zum Glück durchdringen Röntgenstrahlen diese Schleier, sodass die heutigen Röntgensatelliten bessere Einblicke in die Aktivitätsregionen gewähren als das Hubble-Weltraumteleskop, auch wenn ihr Auflösungsvermögen geringer ist (siehe Foto auf der vorherigen Doppelseite).

Zweitens gibt es statistische Hinweise auf einen Zusammenhang. So hat ein Team unter Leitung von Guinevere Kauffmann vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching und Timothy Heckman von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore eine spektrale Durchmusterung von 23000 aktiven Galaxienkernen durchgeführt. Dabei werteten sie das Auftreten einer Emissionslinie hoch ionisierten Sauerstoffs als Indikator für einen aktiven Galaxienkern und das Vorhandensein einer starken Wasserstoffabsorptionslinie als Hinweis auf einen Starburst. Die Forscher konnten eine starke Korrelation beider Phänomene feststellen.

Zudem weisen nicht nur aktive Galaxien extrem massereiche Schwarze Löcher in ihren Zentren auf – auch in inaktiven Sternsystemen sind diese Schwerkraftmonster vorhanden. Es scheint, als seien riesige Schwarze Löcher überall vorhanden. Allerdings schlummern sie sozusagen die meiste Zeit unauffällig vor sich hin. Sie leuchten nur dann für begrenzte Zeit als aktive Kerne auf, wenn ausreichend viel Gas in ihre Nähe kommt und nach und nach in sie einströmt. John Kormendy von der Universität von Texas in Austin, Douglas O. Richstone von der Universität von Michigan in Ann Arbor und andere konnten einen statistischen Zusammenhang zwischen der Masse des Schwarzen Lochs und der Gesamtmasse der Sterne im Zentralbereich einer Galaxie nachweisen: Demnach umfasst das Loch etwa ein Tausendstel der Sternenmasse. Dieser Zusammenhang besteht auch für die meisten – aber nicht alle – aktiven Galaxienkerne. Es muss also ein Mechanismus gewirkt haben, der die Masse des Schwarzen Lochs in eine feste Beziehung zum Ausmaß der Sternentstehung im Zentralbereich gesetzt hat. Doch es gibt noch offene Fragen, und bisher ist dieser Mechanismus nicht richtig verstanden. ▷

Kernaktivität und Starbursts: vier mögliche Arten des Zusammenhangs



▷ Ein Zusammenhang zwischen Kernaktivität und Starbursts besteht womöglich auch für das nur 24 000 Lichtjahre entfernte Zentrum unseres Milchstraßensystems. Die rasche Bewegung von Sternen und Gas um seinen Mittelpunkt lässt auf ein kompaktes Objekt von etwa 2,5 Millionen Sonnenmassen schließen (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 26). Die Radio- und Röntgenstrahlung von dort zeigt an, dass es sich um ein extrem massereiches Schwarzes Loch handelt – ohne große Aktivität zurzeit, denn es saugt nur sporadisch Materie ein. Einige Forscher sprechen von einem Kern mit Mini-Aktivität, die nur ein Zehnmillionstel der Strahlungsleistung eines Quasars erreicht. Obwohl sich in der Zentralregion der Galaxis heute kein Starburst ereignet, deuten einige junge Sternhaufen dort darauf hin, dass vor einigen Millionen Jahren die Sternbildungsrate deutlich erhöht war.

Des Weiteren zeigen Beobachtungen von Galaxien in Entfernungen von über 10 Milliarden Lichtjahren, dass es im jungen Universum einen noch engeren Zusammenhang zwischen aktiven Kernen und Starbursts gab. Damals waren zwei Typen von Galaxien viel häufiger als heute: die so genannten ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien sowie Radiogalaxien. Bei beiden Typen handelt es sich um Sternsysteme in einem sehr frühen Entwicklungsstadium oder um Verschmelzungspaare. Ihre Zentralgebiete enthalten Milliarden Sonnenmassen an kaltem, dichtem Gas. Und sie bergen sowohl aktive Kerne als auch Starburst-Regionen.

Starburst oder aktiver Kern …

Ferner sind die Wirtsgalaxien von Quasaren – die ebenfalls sehr weit entfernt sind – durch Wechselwirkung mit Nachbarsystemen gestört; und ihre spektralen Eigenschaften weisen auf eine hohe Sternentstehungsrate hin.

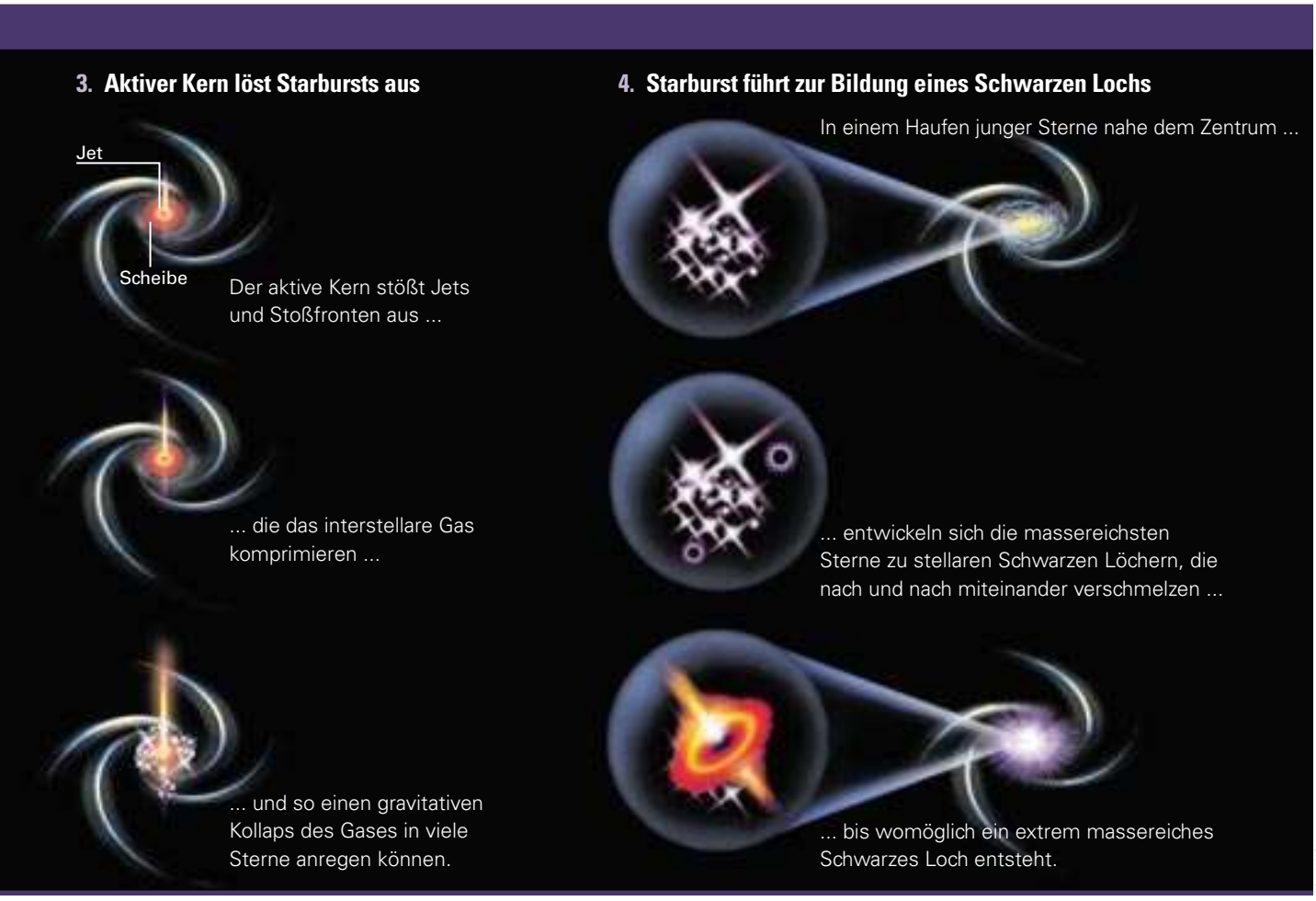
Und schließlich weisen Untersuchungen der aus allen Richtungen bei uns eintreffenden Röntgenhintergrundstrahlung auf eine Population von aktiven Galaxienkernen hin, die für optische Teleskope im Verborgenen liegen. Offenbar findet in diesen Objekten zeitgleich ein Starburst statt, der die aktiven Kerne mit Staubschwaden einhüllt (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2002, S. 22).

Grundsätzlich kommen vier Möglichkeiten für den Zusammenhang zwischen Kernaktivität und Starbursts infrage:

- Beide Phänomene sind Ausdruck desselben Prozesses,
- ein dritter Vorgang ruft beide Phänomene hervor,
- der aktive Kern löst den Starburst aus,
- der Starburst ist für die Kernaktivität verantwortlich.

Die erste Möglichkeit gibt in eingeschränkter Form den alten Gedanken wieder, die Kernaktivität sei ein kompakter Starburst. Dies ist zwar als generelle Erklärung fehlgeschlagen. Doch Galaxienkerne, die nur schwach aktiv sind, könnten ihre Energie durchaus aus heftigen Sternentstehungsprozessen beziehen. Immerhin ist denkbar, dass eine Starburst-Region sehr kompakt ist und deshalb im Teleskop aussieht wie die Umgebung eines Schwarzen Lochs.

Der zweiten Möglichkeit zufolge wäre der Zusammenhang nur ein schein-



barer. So könnte beispielsweise die Wechselwirkung zweier Galaxien durch Störung des Gasgefüges einerseits einen Starburst auslösen und andererseits das zentrale Schwarze Loch einer der Galaxien füttern. Interessanterweise könnte sich auf diese Weise sogar ein extrem massereiches Schwarzes Loch überhaupt erst bilden. Die Zeit, die dafür benötigt würde, ist mit etwa 10 Millionen Jahren ebenso lang wie die typische Lebensdauer eines Starbursts. Auch die Wechselwirkungs- oder Verschmelzungsdauer zweier Galaxien ist ungefähr von dieser Größenordnung.

Die meisten Forscher konzentrieren ihre Untersuchungen auf die verbleibenden zwei Möglichkeiten, wonach das eine Phänomen das andere ursächlich nach sich zieht. Dass ein Schwarzes Loch die Sternentstehung weiter außen in der Galaxie durch seine Schwerkraftwirkung anregt, scheint ja zunächst wenig plausibel. Doch Françoise Combes von der Pariser Sternwarte, die ein zentrales Schwarzes Loch als gemeinsamen Auslöser für die Kernaktivität und für Starbursts favorisiert, argumentiert, der Schwerkraftschlund würde auf jeden Fall zu einer Konzentration von Gas im Zentralbereich führen und so auch die Sternentstehung zumindest dort begünstigen. Ihre Beweisführung wirkt durchaus überzeugend, denn viele nahe Galaxien mit aktivem Kern zeigen ebenfalls dichte, mit Staub gefüllte Gaskonzentrationen im Zentrum, die von weiter außen stammen könnten. Allerdings weisen diese Schwaden nicht in allen Fällen die theoretisch vorhergesagte Struktur auf.

… das ist wie die Frage nach dem Huhn und dem Ei

Statt durch von außen ins Zentrum gelangte Materie könnte die Sternbildung auch durch einen Energiestrom aus dem Kern verursacht werden. Sobald der Kern Aktivität entwickelt hat, gehen von ihm Jets und Stoßwellen aus, die das interstellare Gas stören. Längs einer Stoßfront staut sich das Gas, wird instabil und kollabiert. Aufnahmen des Röntgensatelliten Chandra von der nahen Radiogalaxie Centaurus A, die eine extrem hohe Sternentstehungsrate aufweist, legen nahe, dass ihr Kern vor etwa 10 Millionen Jahren einen gewaltigen Aktivitätsausbruch erlebte. Um den Kern erstreckt sich ein Ring mit etwa 25 000 Lichtjahren Durchmesser, von dem starke Röntgenstrahlung ausgeht. Der Ring ist überlagert mit bogenförmigen Gebieten voller junger Sterne. Der Ring könnte eine Stoßfront sein, die auf den Ausbruch zurückgeht.

Die Hypothese, die Kernaktivität von Galaxien würde Starbursts nach sich ziehen, lässt sich auch auf die Entwicklung der Galaxien im Allgemeinen ausdehnen. Demnach wären nicht Sterne, sondern Schwarze Löcher die ersten kompakten Objekte im Universum, die Licht in das frühe Universum brachten. Weiterhin postulieren einige Forscher, dass unser Sonnensystem während eines Starbursts entstanden ist. Wenn diesen die Kernaktivität des Milchstraßensystems ausgelöst hat, dann würden wir unsere Existenz einem Schwarzen Loch verdanken.

Die meisten Beobachtungsdaten und die stärksten theoretischen Argumente sprechen allerdings dafür, dass das Ursache-Wirkungs-Verhältnis andersherum ▷

besteht, dass also Starbursts die Bildung oder das Wachstum extrem massereicher Schwarzer Löcher nach sich ziehen.

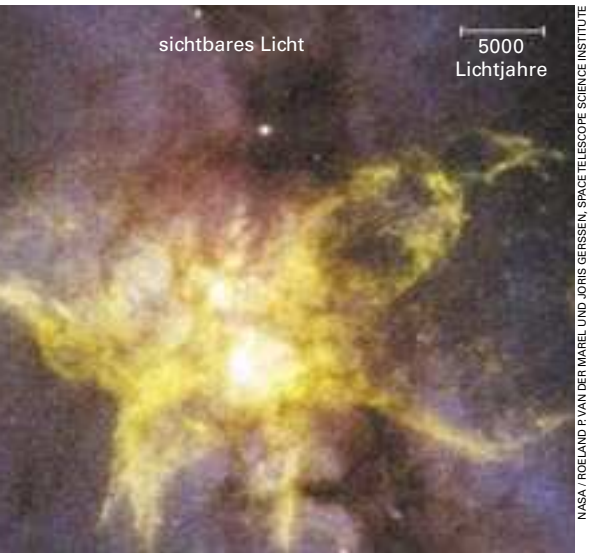
Solch eine Ereignisfolge ergibt sich recht zwanglos aus der Entwicklung von Sternhaufen. Denn ein Starburst hinterlässt besonders kompakte Sternhaufen, in denen es häufig zu Kollisionen kommt (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2003, S. 28). Die massereichsten Sterne entwickeln sich schnell zu Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Und alle diese Objekte verschmelzen miteinander. Über die Jahrmillionen hinweg kann sich so ein Schwarzes Loch ungeheurer Masse bilden.

Auch aus sonnenähnlichen Sternen kann letztlich ein massereiches Schwarzes Loch hervorgehen, auch wenn sie selbst nach Beendigung ihrer nuklearen Energieerzeugung nicht als Neutronensterne oder Schwarze Löcher enden. Befinden sie sich nämlich in einem dichten Sternhaufen, so können sich durch aufeinander folgende Kollisionen Megasterne mit dem Mehrhundert- bis Tausendfachen der Sonnenmasse bilden. Diese enden wiederum als Schwarze Löcher. Der gesamte Vorgang würde etwa 100 Millionen Jahre dauern. Das ist deutlich geringer als die Lebensdauer von Galaxien und kurz genug, um das Vorhandensein der frühesten Quasare erklären zu können.

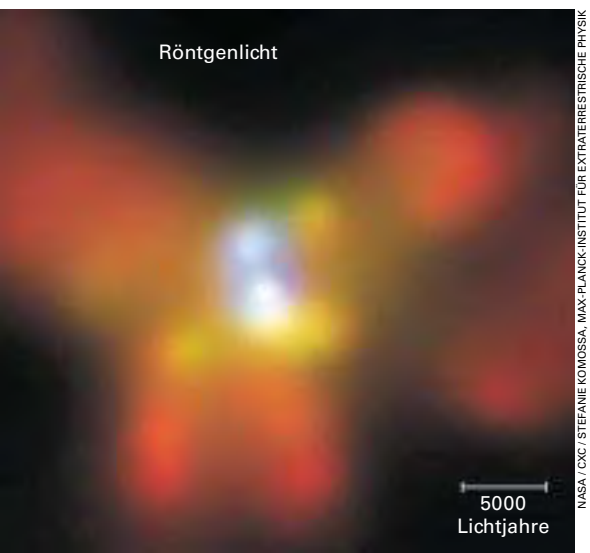
Unabhängig davon, wie sie entstanden sind, würden solche massereichen Schwarzen Löcher allmählich in das Zentrum ihrer Galaxie wandern, um dort nach und nach miteinander zu einem Super-Loch zu verschmelzen. Diese Vorstellung wird unterstützt durch Beobachtungen der Galaxie NGC 6240, in der zwei Schwarze Löcher einander eng umkreisen und in nicht sehr ferner Zukunft verschmelzen werden (siehe beide Fotos auf dieser Seite).

Ein Schwarzes Loch kann ebenfalls wachsen, indem es kontinuierlich Gas und einzelne Sterne aus seiner Umgebung verschluckt. Selbst fernere Sternhaufen können zum Wachstum des Lochs beitragen. Denn durch Reibungsprozesse, die auf der dynamischen und gravitativen Wechselwirkung mit der gesamten Galaxie beruhen, verlieren diese Haufen kinetische Energie und Drehmoment. So driften sie allmählich nach innen und die Gezeitenkräfte ziehen sie immer weiter auseinander. Im Laufe von Jahrmilliarden kann auf diese Weise eine Materiemenge von einigen 10 Millionen Sonnenmassen in das zentrale Loch stürzen. Störungen der galaktischen Scheibe, die eine Wechselwirkung oder gar eine Verschmelzung mit einer anderen Galaxie hervorruft, können sogar noch effektiver Materie in das Zentrum spülen.

Das allmähliche Wachstum der extrem massereichen Schwarzen Löcher aus Sternhaufen impliziert eine neue Klasse Schwarzer Löcher als Zwischenschritt. Ihre Masse könnte zwischen einer und der milliardenfachen Masse eines Sterns betragen. In den letzten zehn Jahren haben sich Hinweise auf diesen Zwischentyp gehäuft und zwar in Form so genannter ultraleuchtkräftiger Röntgenquellen in nahen Galaxien. Sie haben die zehn- bis mehrhundertfache Strahlungsleistung von Neutronensternen oder stellaren Schwarzen Löchern. Es könnte sich bei diesen Objekten aber auch um Neutronensterne handeln, bei denen die Strahlung vorzugsweise in eine Richtung austritt, die zufällig auf den Beobachter weist. In jüngster Zeit mehren sich hingegen die Indizien, dass es doch Schwarze Löcher mit bis zu einigen hundert Sonnenmassen sind.



NASA / ROELAND P. VAN DER MAREL UND JORIS GERSSEN, SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE



NASA / CXC / STEFANIE KOMOSSA, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK

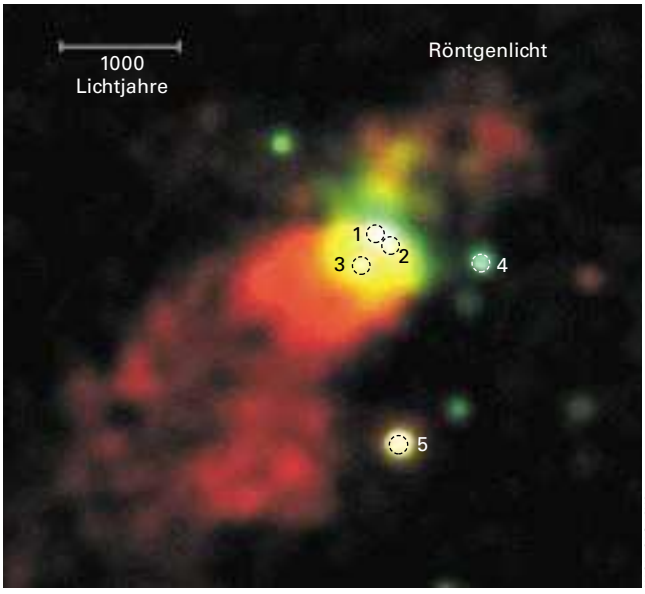
Die Schmetterlingsform verrät es: NGC 6240 ist keine Einzelgalaxie, sondern ein verschmelzendes Galaxienpaar. Jedes der beiden Sternsysteme birgt ein Schwarzes Loch in seinem Kern, das als Röntgenquelle aufleuchtet (blaue Flecken im unteren Bild). Die diffuse Röntgenstrahlung (rot) weist auf einen Starburst hin. NGC 6240 ist ein typisches System, das den Zusammenhang von gravitativer Wechselwirkung, Starburst und Kernaktivität aufzeigt.

Kandidaten für Mittelschwergewicht

Im vergangenen Jahr fanden zwei Forschergruppen – die eine um Roeland P. van der Marel vom Space Telescope Science Institute in Baltimore (Massachusetts), die andere um Michael Rich von der Universität von Kalifornien in Los Angeles – Hinweise auf Schwarze Löcher mittlerer Masse in den Zentren von zwei Kugelsternhaufen, M 15 und M 31-G 1. Deren Sterne bewegen sich so schnell um das jeweilige Zentrum, dass nur kompakte Körper von 2000 beziehungsweise 20 000 Sonnenmassen sie auf ihren Bahnen halten können. Es muss sich bei den kompakten Körpern nicht unbedingt um Schwarze Löcher der genannten Massen handeln, es könnten auch Ansammlungen von Neutronensternen und kleineren Schwarzen Löchern sein. Doch über kurz oder lang sollten sich daraus Schwarze Löcher mittlerer Masse entwickeln.

Tod E. Strohmayer and Richard F. Mushotzky vom Goddard-Raumflugzentrum der Nasa fanden kürzlich heraus, dass eine der ultraleuchtkräftigen Quellen nahe dem Zentrum der Starburst-Galaxie M 82 ihre Helligkeit innerhalb von etwa 18 Sekunden ändern kann. Diese Fluktuationen sind einerseits zu langsam und zu unregelmäßig, um von der Oberfläche eines Neutronensterns zu stammen; andererseits ist die Strahlung zu stark, um von Materie erzeugt zu werden, die einen Neutronenstern umkreist. Wenn die Quelle der Strahlung Gas in der Nähe eines Schwarzen Lochs ist, dann müsste dieses einige tausend Sonnenmassen in sich vereinen. Jon Miller vom Harvard-Smithsonian-Zentrum für Astrophysik und seine Koautoren entdeckten in der Spiralgalaxie NGC 1313 zwei ultraleuchtkräftige Röntgenquellen,

EUROPÄISCHE SÜDSTERNWARTE



NASA / SAO / CXC

Das Zentralgebiet der Galaxie NGC 253 (links) weist darauf hin, dass Starbursts extrem massereiche Schwarze Löcher verursachen. Die fünf markierten Röntgenquellen (rechts) sind vermutlich Schwarze Löcher mittlerer Masse, die als Zwischenschritt entstehen.

die kühler als stellare Schwarze Löcher sind. Die Temperatur in der Umgebung Schwarzer Löcher sollte aus theoretischen Gründen abnehmen, wenn die Masse des Lochs zunimmt, sodass es sich bei den Quellen um Löcher mittlerer Masse handeln müsste.

Diese Kandidaten für Schwarze Löcher des neuen Typs liegen nicht in den Kernen ihrer Galaxien. Deshalb ist nicht eindeutig klar, welche Bedeutung sie für den Zusammenhang zwischen Starbursts und Kernaktivität haben. Anders ist dies für meine eigenen Beobachtungsergebnisse zur Starburst-Galaxie NGC 253. Noch vor 1995 dachten die Astrophysiker, die starke Röntgenstrahlung dieses Sternsystems würde vom heißen Gas des Starbursts stammen. Doch dann entdeckte ich damals im Röntgenspektrum der Galaxie Strahlung, wie sie für Schwarze Löcher typisch ist. Danach mussten meine Kollegen und ich noch bis zum Jahr 2001 warten, bis wir mit dem Röntgensatelliten Chandra eine Direktaufnahme gewinnen konnten (siehe Foto rechts oben).

Wir entdeckten fünf ultraleuchtkräftige Röntgenquellen innerhalb von 3000 Lichtjahren Abstand zum Zentrum von NGC 253. Eine von ihnen, die direkt im Zentrum liegt, ist etwa hundertfach heller als ein Neutronenstern oder ein stellares Schwarzes Loch, was auf eine Größe von etwa hundert Sonnenmassen schließen lässt. Es könnte sich um ein Objekt handeln, das sich gerade zu einem typischen aktiven Galaxienkern entwickelt.

Die Ereignisse könnten folgendermaßen ablaufen: Nahe dem Zentrum der Galaxie ereignet sich ein Starburst. Die daraus hervorgegangenen massereichen Sterne kollabieren und verschmelzen zu Schwarzen Löchern mittlerer Masse, die sich danach allmählich zum Kern der Galaxie bewegen, um sich dort zu einem extrem massereichen Loch zu vereinen. Während der Starburst abklingt, beginnt der Kern aktiv zu werden.

Zwei Extreme kosmischer Entwicklung

Solche Untersuchungen zur Entwicklung von Kernaktivität aus einem Starburst können auch die Entstehung der leuchtkräftigsten Kerne, der Quasare, erhellen. So fragen sich die Forscher, warum es Quasare viel häufiger im jungen Universum gibt. Womöglich haben sich in der frühen Entwicklungsphase der Galaxien Starbursts weitaus zahlreicher ereignet als heute.

Doch vielleicht sind die Zusammenhänge auch komplizierter als ein einfacher Ursache-Wirkungs-Zusammenhang. Starbursts und Kernaktivität könnten sich in einer Galaxie auch zyklisch abwechseln und teilweise überlagern. Die wahren Kausalitätsbeziehungen werden sich wohl erst mit neuen Generationen von Teleskopen und Satelliten ermitteln lassen.

Noch in diesem Jahr will die Nasa den Infrarotsatelliten SIRTF (Space Infrared Telescope Facility) starten, der den Zusammenhang zwischen Starbursts und Kernaktivität in den allerjüngsten Galaxien untersuchen kann. Dann können die Astronomen visuelle und infrarote Direktaufnahmen und Spektren des jungen Universums mit Röntgenmessungen vergleichen. Ebenso wichtig ist es aber, auch weiterhin nahe Galaxien wie etwa NGC 253 genauestens zu beobachten.

Der Zusammenhang zwischen Starbursts und Kernaktivität verknüpft zwei Extreme der kosmischen Entwicklung. Während Starbursts die Geburt von Himmelskörpern darstellen, repräsentieren aktive Kerne ihr Ende – denn nichts kann den Sturz in ein Schwarzes Loch rückgängig machen. Zwischen diesen beiden Extremen finden all jene Entwicklungsschritte statt, die eine Galaxie – und damit auch unser Milchstraßensystem – durchläuft. ◁

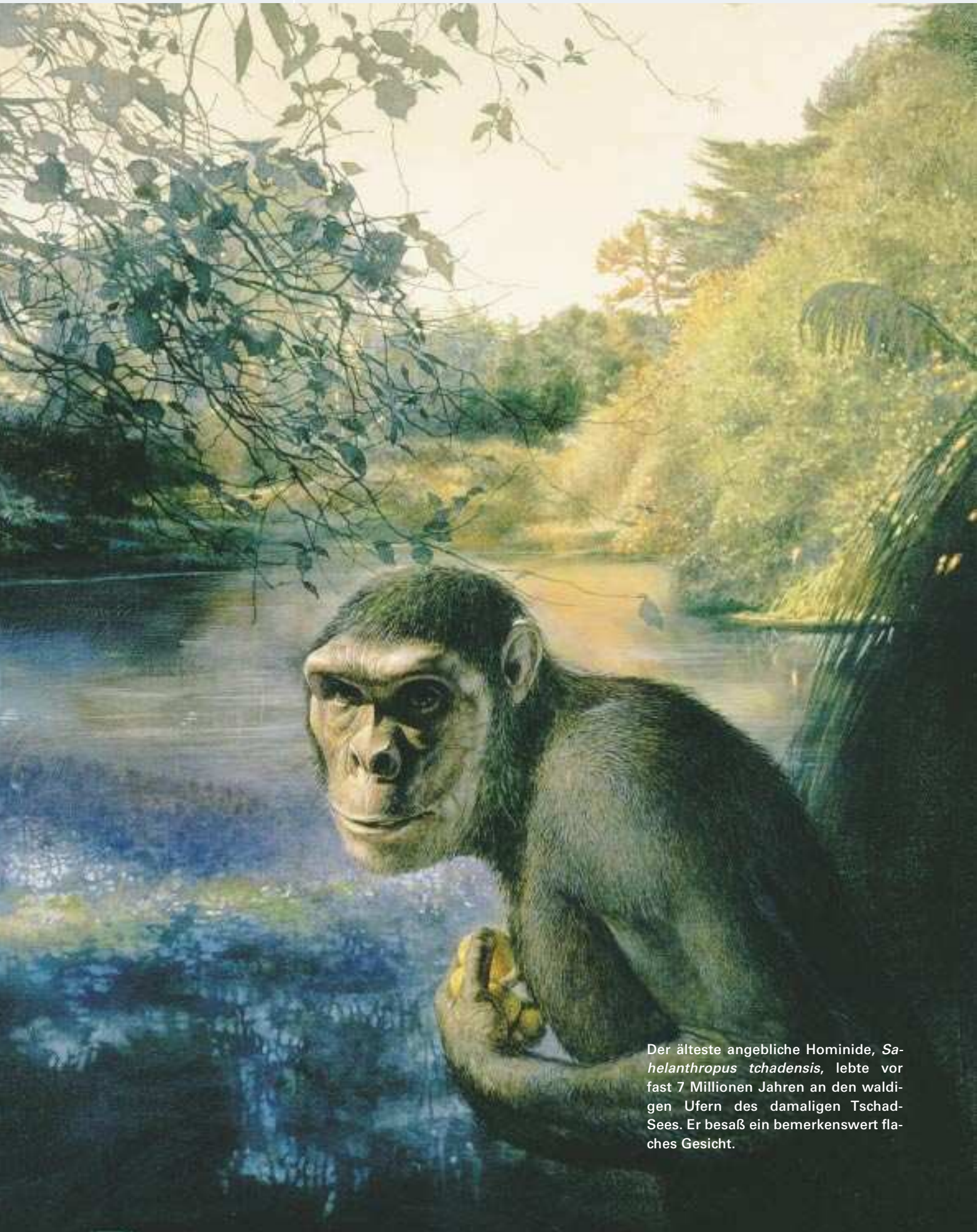
Kimberly Weaver ist Astrophysikerin am Laboratorium für Hochenergieastrophysik des Goddard-Raumflugzentrums der Nasa und Assistenzprofessorin an der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland). Sie hat sich auf Röntgenbeobachtungen von Schwarzen Löchern, aktiven Galaxienkernen und Starbursts spezialisiert.

Schöpfung ohne Ende. Sterne und Weltraum Special Nr. 2, 2. Auflage, Heidelberg 2002.

Das junge Universum. Sterne und Weltraum Special 1/03, Heidelberg 2003.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Der älteste angebliche Hominide, *Sahelanthropus tchadensis*, lebte vor fast 7 Millionen Jahren an den waldigen Ufern des damaligen Tschad-Sees. Er besaß ein bemerkenswert flaches Gesicht.

Wer waren die ersten Hominiden?

Die Forschung war den Anfängen der menschlichen Evolution noch nie so nah. Doch Anthropologen streiten, ob der neu entdeckte, 7 Millionen Jahre alte Schädel aus dem Tschad vom Urahn der Hominiden stammt.

Von Kate Wong

Behutsam hebt Michel Brunet den steinernen Schädel aus der gepolsterten Metallbox mit dem Vorhängeschloss. Wie ein rohes Ei platziert er das wertvolle Stück vor mich auf den Tisch. »Das ist jetzt der Allerälteste«, bemerkt er dazu leise, »der erste Hominide!«

Der bräunliche Schädel, den die Wissenschaftler aus vielen halb zerbröselten Einzelteilen zusammengesetzt haben, ist kaum größer als eine Kokosnuss. Mit der nur wenig vorspringenden Schnauze und den auffallend kräftigen Überaugenwülsten, welche die Augenhöhlen verschatten, wirkt dieses Gesicht auf mich zugleich vertraut und fremd. Für den Paläoanthropologen von der Universität Poitiers (Frankreich) aber gehört dieses Antlitz einem von ihm seit 26 Jahren gesuchten Verwandten.

Die Fachwelt geriet in Aufregung, als Brunet und sein Team den Fund im Wissenschaftsmagazin »Nature« in der Ausgabe vom 11. Juli 2002 vorstellten. Im Jahr zuvor hatten die Forscher die Schädelfragmente in der Djurab-Wüste im nördlichen Tschad geborgen. Sie gaben diesem Primaten den Spitznamen Toumaï – »Hoffnung auf Leben«. So nennen die nomadischen Goran Kinder, die kurz vor der Trockenzeit geboren werden.

Die wissenschaftliche Bezeichnung des Fossils aus einer ständig sandsturmgepeitschten Dünenlandschaft lautet *Sahelanthropus tchadensis*. Mit einem Alter von fast 7 Millionen Jahren könnte der bemerkenswert vollständig erhaltene Schädel derzeit den frühesten Vertreter in der Linie zum Menschen repräsentieren. Wahrscheinlich lebte dieser Primat sozusagen hautnah an dem Zeitpunkt, als die Menschen- und die Schimpansenvorfahren auseinander gingen, vermutet Brunet.

Dass der Mensch affenähnliche Vorläufer aufweist – was Charles Darwin vor über 130 Jahren bereits aus seiner Evolutionstheorie gefolgert hatte –, glaubten Anfang des 20. Jahrhunderts immer noch die wenigsten. Darwin hatte auch vermutet, dass unsere ältesten Ahnen, die sich schon von anderen Affen getrennt hatten, in Afrika zu finden sein würden: auf dem Kontinent, wo heute Schimpansen und Gorillas als unsere nächsten Vettern leben.

Fassbar wurde diese Verwandtschaft jedoch erstmals Mitte der 1920er Jahre, als Raymond Dart von der Universität von Witwatersrand (Südafrika) den Schädel des »Kindes von Taung« beschrieb und einer ausgestorbenen Vormenschenart zuordnete, die der Paläoanthropologe ▷

IN KÜRZE

- Nach bisheriger Lehrmeinung entstanden die **ersten Vormenschen** in Ostafrika vor ungefähr 5 oder 6 Millionen Jahren, und sie entwickelten den aufrechten Gang in der Savanne. Jedoch gab es bis vor wenigen Jahren keine Fossilien von Hominiden, die älter als 4,4 Millionen Jahre waren.
- Neue, zwischen 5,5 und fast **7 Millionen Jahre alte Fossilien** aus dem Tschad, aus Kenia und Äthiopien könnten von noch früheren Hominiden herrühren.
- Der **aufrechte Gang** wäre dann nicht in der Savanne entstanden. Allerdings ist noch strittig, ob und welche der Funde von menschlichen Vorfahren oder überhaupt von Hominiden stammen.

KAZUHIKO SANO

▷ *Australopithecus africanus*, »afrikanischer Südaffe«, nannte. Dart erntete damals von seinen Kollegen vor allem Skepsis und Ablehnung. Die meisten hielten das Fossil für den Schädel eines jungen Gorillas. Breitere Anerkennung fand Darts These erst, nachdem um 1950 in Südafrika Überreste einer weiteren fossilen Hominidenart zum Vorschein gekommen waren. Diese kräftig gebaute Art erhielt später den wissenschaftlichen Namen *Australopithecus robustus*.

»Lucys« erweiterte Verwandtschaft

In den folgenden Jahrzehnten überzeugten vor allem zahlreiche ostafrikanische Funde die Fachwelt, dass in Afrika menschliche Vorfahren gelebt hatten, die noch stark an Menschenaffen erinnernde Züge trugen. Bis Ende der 1970er Jahre kamen im Osten des Kontinents als weitere Vormenschen-Arten *Australopithecus boisei*, *A. aethiopicus* und *A. afarensis* hinzu. Von *A. afarensis* wurde das Skelett von »Lucy« berühmt. Es bewies eindeutig, dass diese Primaten damals längst den aufrechten Gang erworben hatten. Diese Art, von der vermutlich die Gattung *Homo* abstammt, existierte vor 3,6 bis 2,9 Millionen Jahren.

Auch die anderen *Australopithecus*-Arten unterschieden sich grundlegend von den unspezialisierten, vierbeinigen Menschenaffen der vorangegangenen Epoche. Jede dieser Hominiden-Arten lebte zwar in einer eigenen ökologischen Nische, doch waren sie alle an den aufrechten Gang angepasst. Und sie besaßen kleine Eckzähne und kräftige Backenzähne, ganz anders als die Menschenaffen vor rund 15 Millionen Jahren.

Doch wie hatten Lucys Vorfahren ausgesehen? Wann hatten sie den aufrechten Gang entwickelt? Zwischen den bis dahin ältesten Hominiden und Menschenaffen, die als ihre Ahnen in Frage kamen, klaffte viele Jahre lang eine weite Fossilienlücke. Die jüngsten bis dahin aufgefundenen Überreste jener Menschenaffen waren 12 Millionen Jahre alt, die älteste Art der Gattung *Australopithecus* war die von Lucy.

Erst in den 1990er Jahren begannen die Wissenschaftler in dieser Lücke fündig zu werden. Meave Leakey und ihr Team von den Nationalmuseen Kenias entdeckten damals die 4 Millionen Jahre alte Art *Australopithecus anamensis*. Diese Fossilien wirken ein wenig archaischer als die von Lucys Artgenossen. Nach ▷

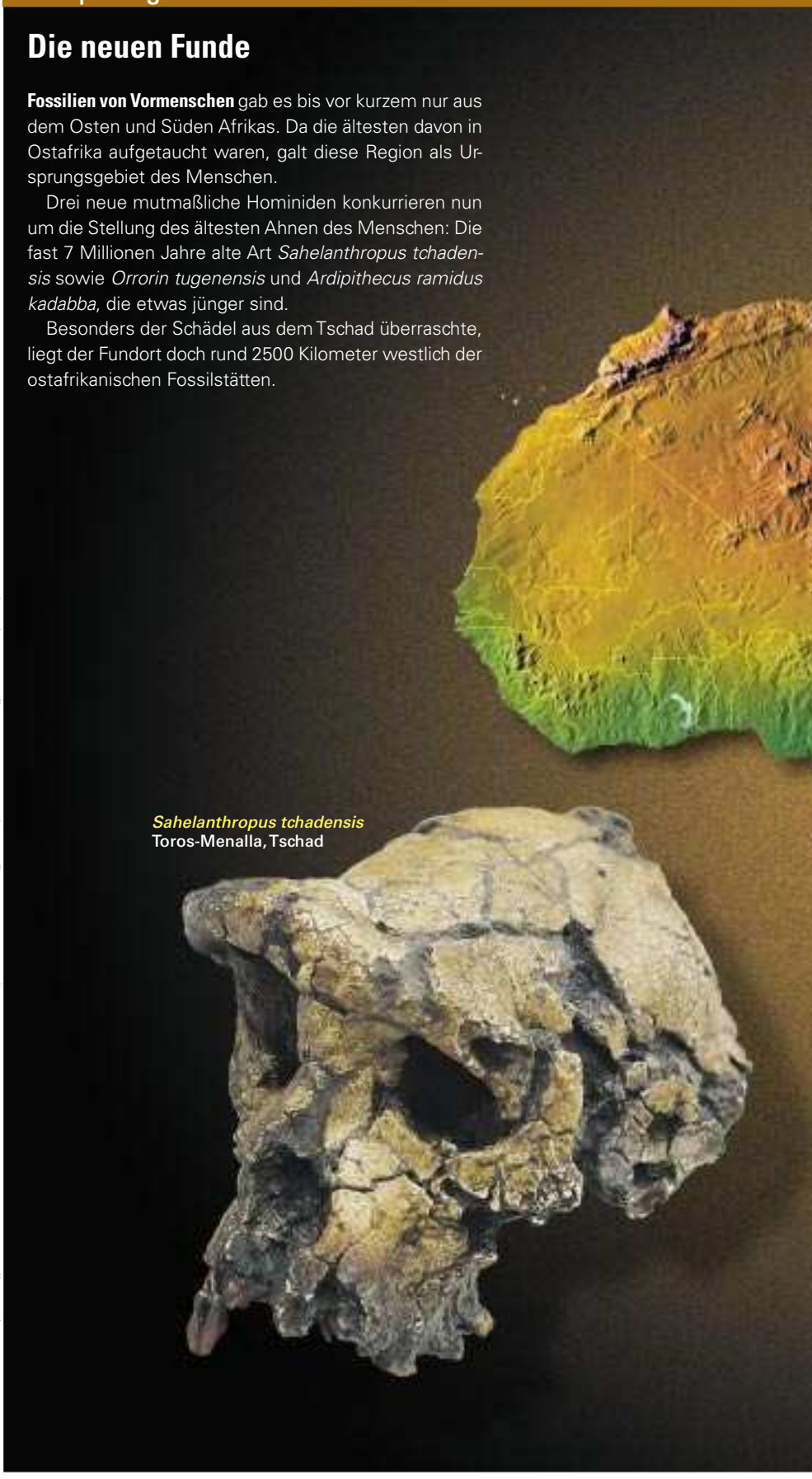
Ursprünge in Ost- oder Zentralafrika?

Die neuen Funde

Fossilien von Vormenschen gab es bis vor kurzem nur aus dem Osten und Süden Afrikas. Da die ältesten davon in Ostafrika aufgetaucht waren, galt diese Region als Ursprungsgebiet des Menschen.

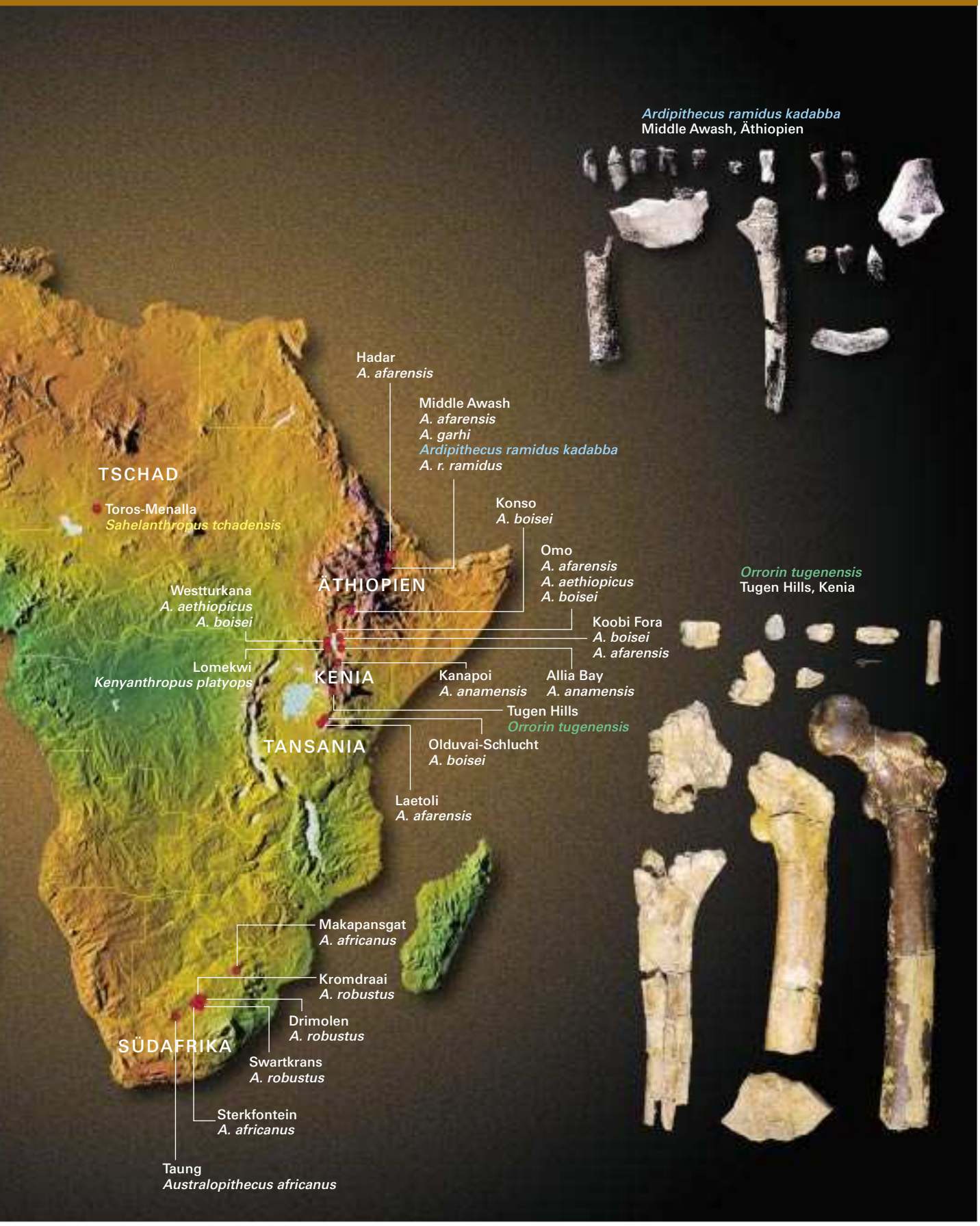
Drei neue mutmaßliche Hominiden konkurrieren nun um die Stellung des ältesten Ahnen des Menschen: Die fast 7 Millionen Jahre alte Art *Sahelanthropus tchadensis* sowie *Orrorin tugenensis* und *Ardipithecus ramidus kadabba*, die etwas jünger sind.

Besonders der Schädel aus dem Tschad überraschte, liegt der Fundort doch rund 2500 Kilometer westlich der ostafrikanischen Fossilstätten.



Sahelanthropus tchadensis
Toros-Menalla, Tschad

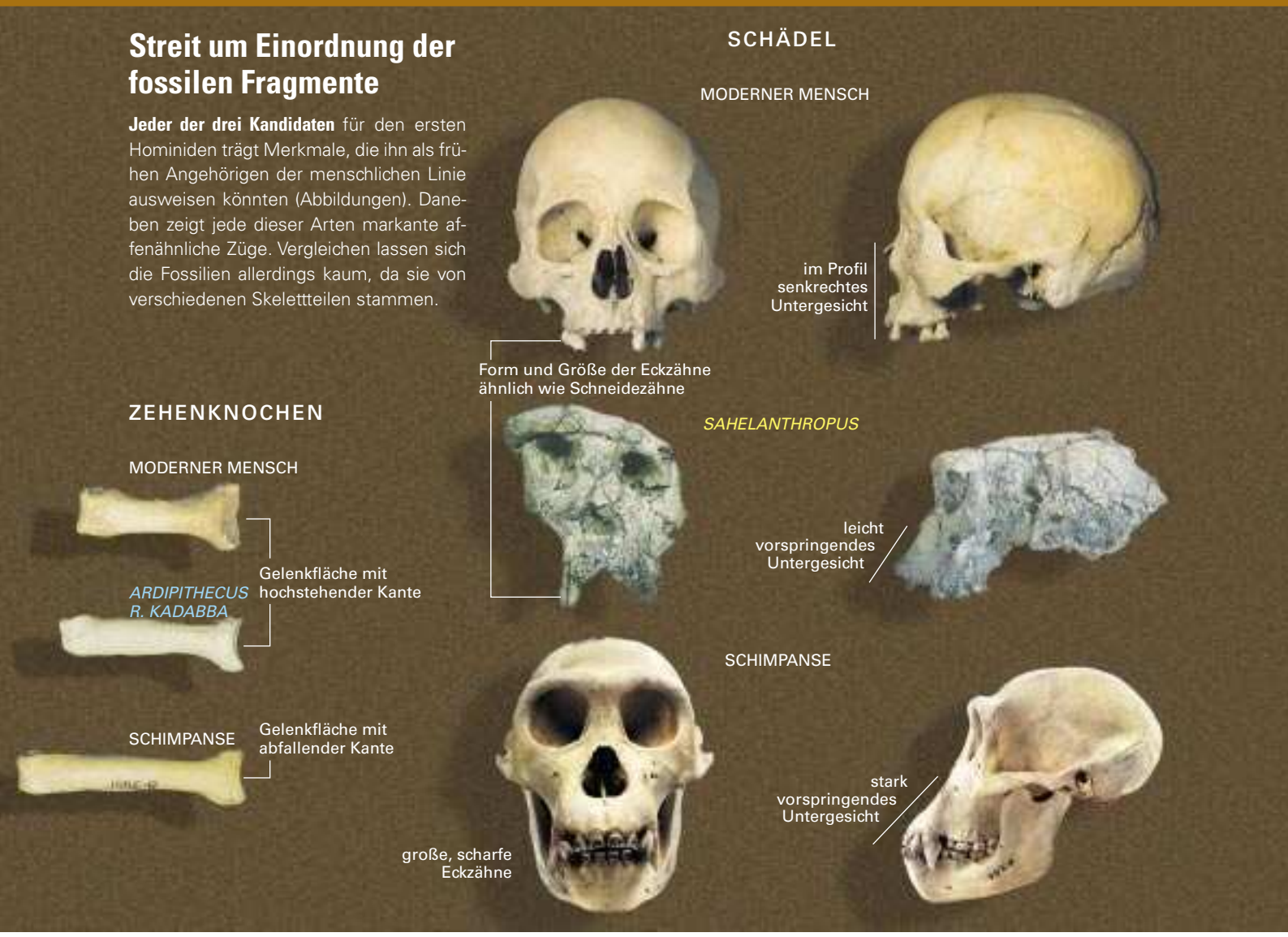
PATRICK ROBERT / CORBIS SYGMA (SCHÄDEL), TIM D. WHITE / BRILL ATLANTA / NATIONAL MUSEUM OF ETHIOPIA (A. R. KABADDA-FOSSILIEN), GAMMA (O. TUGENENSIS-FOSSILIEN), EDWARD BELL (KARTE)


Ardipithecus ramidus kadabba
Middle Awash, Äthiopien
Hadar
A. afarensis
Middle Awash
A. afarensis
A. garhi
Ardipithecus ramidus kadabba
A. r. ramidus
TSCHAD
Toros-Menalla
Sahelanthropus tchadensis
Konso
A. boisei
Omo
A. afarensis
A. aethiopicus
A. boisei
ÄTHIOPIEN
Orrorin tugenensis
Tugen Hills, Kenia
Westturkana
A. aethiopicus
A. boisei
Koobi Fora
A. boisei
A. afarensis
Lomekwi
Kenyanthropus platyops
KENIA
Kanapoi
A. anamensis
Allia Bay
A. anamensis
Tugen Hills
Orrorin tugenensis
TANSANIA
Olduvai-Schlucht
A. boisei
Laetoli
A. afarensis
Makapansgat
A. africanus
Kromdraai
A. robustus
Drimolen
A. robustus
SÜDAFRIKA
Swartkrans
A. robustus
Sterkfontein
A. africanus
Taung
Australopithecus africanus

Welcher war unser Vorfahr?

Streit um Einordnung der fossilen Fragmente

Jeder der drei Kandidaten für den ersten Hominiden trägt Merkmale, die ihn als frühen Angehörigen der menschlichen Linie ausweisen könnten (Abbildungen). Daneben zeigt jede dieser Arten markante affenähnliche Züge. Vergleichen lassen sich die Fossilien allerdings kaum, da sie von verschiedenen Skelettteilen stammen.



▷ Meinung ihrer Entdecker könnten jene Primaten durchaus die gesuchten Vorfahren gewesen sein (siehe den Artikel von M. Leakey und A. Walker in Spektrum der Wissenschaft 8/1997, S. 50).

Vor zehn Jahren entdeckten Tim White von der Universität von Kalifornien in Berkeley und seine Kollegen in Äthiopien sogar 4,4 Millionen Jahre alte Fossilien eines frühen Hominiden, der noch urtümlicher aussah und heute als *Ardipithecus ramidus ramidus* bezeichnet wird. Molekularbiologen spekulierten damals, dass auch noch ältere Hominiden-Fossilien zu finden sein würden. Denn nach ihren Hochrechnungen anhand von genetischen Vergleichen musste die Trennung der Schimpansen- und der Menschenlinie noch um einiges weiter zurückliegen.

In den letzten Jahren hat sich diese These durch mehrere spektakuläre Entdeckungen bestätigt. Inzwischen sind verschiedene Fossilien aufgetaucht, die tatsächlich von Arten nahe der Wurzel der Hominiden zu stammen scheinen. Nach Meinung von Michel Brunet ist auch der Schädel aus dem Tschad hier einzuordnen.

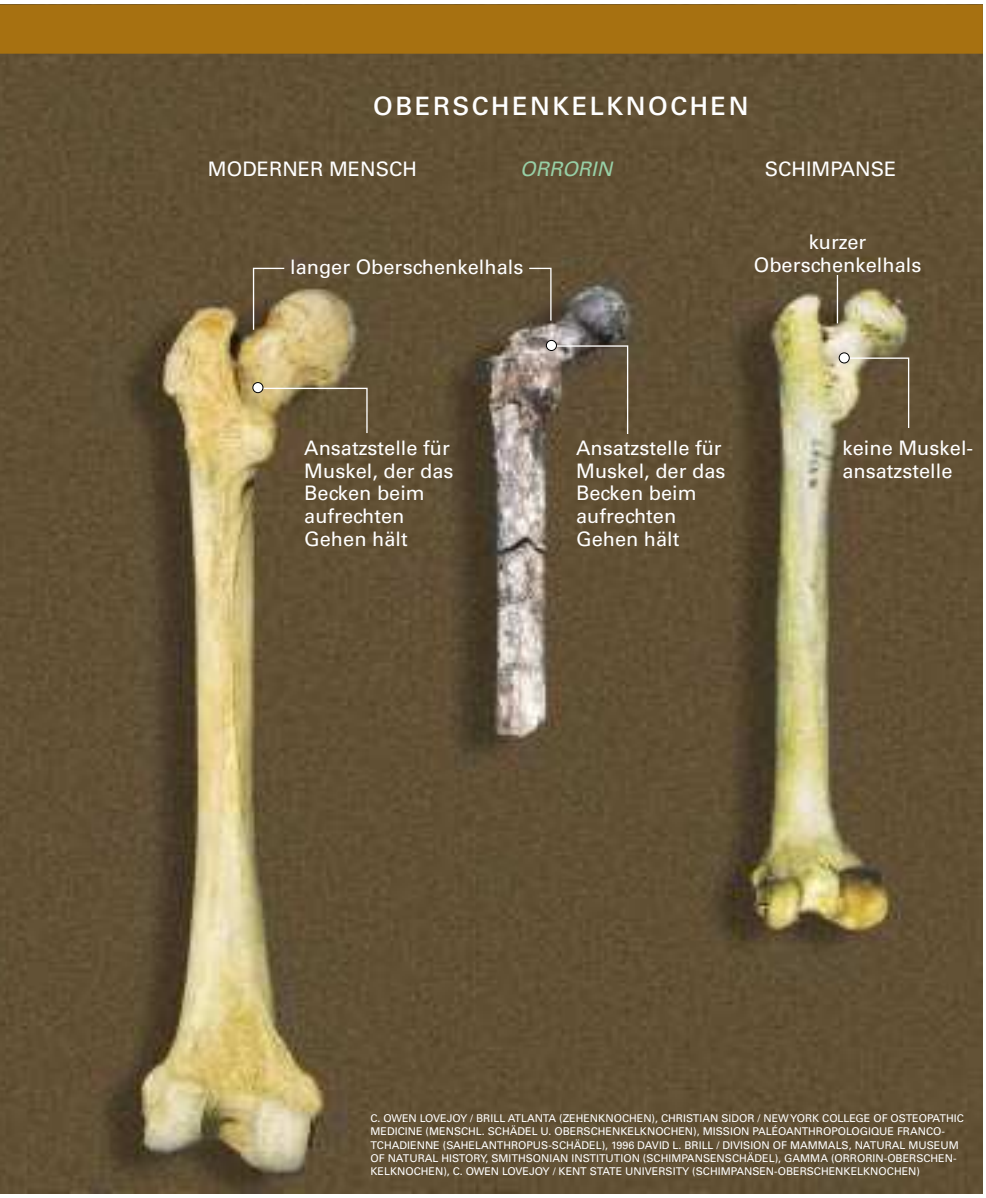
Oberschenkelhals eines Zweibeiners

Diese Funde werfen manche lang gehegten Vorstellungen dazu um, wann – und wo – die menschliche Stammlinie entstand. Auch wie der letzte gemeinsame Vorfahr von Mensch und Schimpanse ausgesehen haben könnte, erscheint damit in neuem Licht.

Über die Einordnung der neuen fossilen Arten sind sich die Wissenschaftler noch keineswegs einig. Heftig diskutieren sie in jedem Einzelfall darüber, ob es sich wirklich um einen menschlichen Vorfahren oder um eine Seitenlinie handelt. Auch müssen sie neu klären, was einen Hominiden überhaupt auszeichnet.

Den Anfang der Fossilien jenseits der 4,4-Millionen-Jahre-Marke machte *Orrorin tugenensis*. Dessen 6 Millionen Jahre alte Überreste entdeckten Martin Pickford und Brigitte Senut vom französischen Nationalmuseum für Naturgeschichte in Paris im Jahr 2000 in den Tugen Hills in Kenia. Inzwischen konnten die Forscher von dieser Art 19 Fundstücke bergen, darunter Kieferfragmente, Zähne, Finger- und Armknochen sowie Bruchstücke von Oberschenkelknochen.

Nach Meinung der Entdecker passt dieser Primat in einigen Merkmalen



deutlich zu den Hominiden. Sie sind überzeugt, dass er normalerweise auf zwei Beinen ging. »Der Oberschenkelknochen ist bemerkenswert menschenähnlich gebaut«, betont Pickford. Dieser Knochen trägt einen ziemlich langen Oberschenkelhals. Beim Menschen ist das auch so. Dadurch steht der Oberschenkelknochen zum Knie hin etwas nach innen, wo er leicht abgewinkelt vom Unterschenkel ansetzt. Das bringt die Knie beim aufrechten Gehen unter den Rumpf und hilft das Körpergewicht besser auszubalancieren. Menschenaffen besitzen einen kurzen Oberschenkelhals. Wenn sie sich aufrichten, bilden die Beinknochen eine gerade Linie, sodass die Hinterbeine etwas seitlich vom Körper stehen. Der Oberschenkelhals von *Orrorin* weist hinten außerdem eine Ansatzstelle für einen Muskel auf, der den Knochen beim aufrechten Gehen in seiner Position hält.

In anderer Hinsicht wirkt dieser Primat noch recht affenähnlich. Er besaß verhältnismäßig lange, spitze Eckzähne. Die Arm- und Fingerknochen lassen vermuten, dass er noch geschickt zu klettern verstand. Trotzdem sind Pickford und Senut davon überzeugt, dass *Orrorin* am Boden schon wie ein Mensch ging. Sie behaupten sogar, dieser Primat habe einen menschenähnlicheren Gang gehabt als die viel jüngere Lucy. Sie halten darum *Orrorin* für einen Vorläufer des Menschen und stellen Lucy in eine Seitenlinie. Von *Orrorin* soll die postulierte Gattung *Praeanthropus* abstammen, der die beiden Forscher auch einen Teil der Fossilien zuordnen, die bisher den Arten *Australopithecus anamensis* und *Australopithecus afarensis* zugewiesen werden. *Ardipithecus* war nach diesem Abstammungsmodell kein Hominide, sondern ein Vorfahre der Schimpansen.

Dass der Oberschenkelhals von *Orrorin* von einem aufrechten Gang zeuge, rief Widerspruch hervor. C. Owen Lovejoy von der Kent State University (Ohio) bewertet die computertomografischen Aufnahmen von der inneren Knochenstruktur anders als Pickford und Senut. Er hält die durch Beanspruchung entstandenen Muster nicht für menschen-, sondern für schimpansenähnlich.

Bei *Australopithecus afarensis*, der Art von Lucy, sehen diese Strukturen laut Lovejoy hingegen ganz wie beim Menschen aus. Er schließt daraus, dass *Orrorin* zwar wohl oft zweibeinig ging, sich dies aber nicht zur Gewohnheit gemacht hatte, sondern sich auch viel in Bäumen fortbewegte. Dabei könne dieser Primat sehr wohl ein Hominide gewesen sein. Denn schließlich entstand der aufrechte Gang sicherlich nicht über Nacht. *Orrorin* mag gewissermaßen auf halbem Wege dorthin gewesen sein: Er konnte ganz gut zweibeinig gehen, war aber daran noch nicht rundum angepasst. Somit hätte er unserer eigenen Gattung ferner gestanden, als Pickford und Senut annehmen.

Die richtige Zehenform für den aufrechten Gang

Neue Fossilien der Art *Ardipithecus ramidus* könnten nach Lovejoy viel eher von einem normalerweise aufrecht gehenden, sehr frühen Hominiden sein. Die Knochenfragmente und Zähne mehrerer Individuen stammen aus der Middle-Awash-Region in Äthiopien. Sie sind zwischen 5,2 und 5,8 Millionen Jahre alt und damit nur wenig jünger als die von *Orrorin*. Der junge Wissenschaftler Yohannes Haile-Selassie von der Universität von Kalifornien in Berkeley veröffentlichte den Fund im Jahr 2001. Dieser Primat wurde als die Unterart *Ardipithecus ramidus kadabba* klassifiziert. Als Lovejoy die Fossilien untersuchte, erkannte er unter anderem, dass das Gelenk eines vollständig erhaltenen Zehenknochens genauso aussieht, wie zu erwarten wäre, wenn diese Art den Fuß beim zweibeinigen Gehen abrollte.

Andere Wissenschaftler überzeugt das nicht. »Beim besten Willen sieht mir das allenfalls nach einer Schimpansenzehe aus«, kommentiert David Begun von der Universität Toronto (Kanada). ▷

1998 DAVID L. BRILL / BRILL ATLANTA

GAMMA

1998 DAVID L. BRILL / BRILL ATLANTA

Erst jahre-, manchmal jahrzehntelange Forschungen unter Extrembedingungen brachten die neuen Fossilien ans Licht: Tim White (oben) und Yohannes Haile-Selassie (Mitte unten) in der Middle-Awash-Region in Äthiopien; Brigitte Senut und Martin Pickford in den Tugen Hills in Kenia (Mitte oben); Michel Brunet in der Djurab-Wüste im Tschad (ganz rechts).

Nach den Fotos, die ihm vorlägen, erscheine der Zehenknochen länger, schlanker und stärker gekrümmt als bei einem regulären Zweibeiner. Die Forscher warten nun gespannt auf die Ergebnisse noch laufender Untersuchungen von White und seinen Mitarbeitern an einem bisher noch nicht beschriebenen Teilskelett von *Ardipithecus*.

Wie auch immer – falls zumindest einer dieser beiden neuen Primaten ein echter Zweibeiner war, müsste man die Anfänge des aufrechten Gangs um fast 1,5 Millionen Jahre zurückdatieren. Dann würde allerdings das in Wissenschaftlerkreisen kursierende Szenario von den Umständen dieser Evolution nicht mehr stimmen. Nach verbreiteter Vorstellung förderte oder erzwang die neue afrikanische Savannenlandschaft eine aufrechte Fortbewegungsweise. Als Vorteile des aufrechten Gangs gelten, dass unsere Vorfahren der sengenden Sonne nun weniger Körperoberfläche boten, dass sie in der Buschvegetation höher hängende Früchte abernten konnten oder dass sie im hohen Gras den Überblick behielten. Nach Analysen der Fundorte waren jedoch sowohl *Orrorin* wie *Ardipithecus* Waldbewohner. In ihrem Umkreis lebten viele typische Waldtiere, zum Beispiel auch baumlebende Affen. Ein Team um Giday Wolde-Gabriel vom Los Alamos Nationallaboratorium, das am Fundort von *Ardipithecus ramidus kadabba* die Bodenzusammensetzung und die damalige Tierwelt untersuchte, schloss aus den Ergebnissen sogar, dass es noch keine 4,4 Millionen Jahre her sein dürfte, dass sich Hominiden aus den relativ feuchten Waldhabitaten auf die Savanne hinauswagten.

Menschenähnliches Gebiss

Demnach hätte der damalige große Klimawandel für die Evolution des aufrechten Gangs längst nicht die Bedeutung gehabt wie bisher angenommen. Schon früher hielt Lovejoy manche der diesbezüglichen Erklärungsansätze für schlecht durchdacht. Scherzhaft meint er: »Säßen die Augen auf den Zehen und man würde den ganzen Tag Handstand machen, um im hohen Gras mehr zu sehen, würden darum aus diesen Geschöpfen doch niemals Hand-Gänger entstehen.« Mit anderen Worten: Aufrechte Körperhaltung und aufrechter Gang sind zweierlei. Eine Selektion auf eine aufrechte Haltung hin bedeutet nicht zwangsläufig eine Selektion auf einen aufrechten Gang. Dessen Entstehung verlangte zusätzliche Anreize. Für den plausibelsten Vorteil hält Lovejoy, dass dadurch die Hände für anderes frei wurden. Die Männer vermochten nun Extranahrung heranzuschaffen und sich damit bei den Frauen einzuschmeicheln. Die Frauen ihrerseits konnten mehr Energie für ihre Kinder erübrigen, wenn sie einen guten Versorger ergattert hatten. In Lovejoys Modell, das er in den 1980er Jahren entwickelte, stellte demnach die Maximierung des Fortpflanzungserfolgs die treibende Kraft dar.

Mitten in die Diskussionen um *Orrorin* und *Ardipithecus ramidus kadabba* kam die Entdeckung des noch älteren *Sahelanthropus* aus dem Tschad. Zwar trägt dieses Fossil hinsichtlich der Fortbewegungsweise der ersten Hominiden nichts bei, da bisher nur der Schädel vorhanden ist, aber keine Skelettteile. Doch das vorhandene Material ist nach Brunet

WITNESS / GAMMA

aussagekräftig genug, um diesen Primaten den Hominiden zuzuordnen. Eine Anzahl von Merkmalen mache die Beziehung zu allen späteren Hominiden deutlich. Aufschlussreich ist besonders das Gebiss. Laut Brunet sprechen die starken Überaugenwülste für ein männliches Tier. Ein Menschenaffe müsste in dem Fall sehr große Eckzähne besitzen. Doch bei *Sahelanthropus* haben sie sich laut Brunet bereits in menschliche Richtung verändert.

Bei allen fossilen und heutigen Menschenaffen rieb beziehunsgweise reibt sich der auffallend große, spitze obere Eckzahn am ersten unteren Vorbackenzahn, der darum ebenfalls markant aussieht. Durch das Schleifen erhält der Eckzahn seine scharfe Schneidekante und stellt eine vorzügliche Waffe dar. Das Merkmal ist besonders bei den Affenmännern ausgeprägt, die ihre imposanten Eckzähne im Wettstreit um das andere Geschlecht einsetzen. Auch der letzte gemeinsame Vorfahre von Mensch und Schimpanse dürfte noch ein solches wehrhaftes Gebiss besessen haben. In der menschlichen Evolution ging das Merkmal verloren und damit auch die großen Zahnlücken im gegenüberstehenden Kiefer. Bei uns berühren sich beim Zubeißen die Oberkanten der viel kleineren Eckzähne, die eher wie Schneidezähne aussehen. Dadurch entstehen völlig andere Abnutzungsspuren.

Zweibeiner: keine Anpassung an die Savanne?

Zugleich wirkt vieles an den *Sahelanthropus*-Fossilien noch affenähnlich. Das Gehirn war nicht größer als bei Menschenaffen und die Augenhöhlen lagen verhältnismäßig weit auseinander. Nach Brunet bedeutet dieses Mosaik ursprünglicher und neuer Merkmale, dass jener Primat dem letzten gemeinsamen Vorfahren von Mensch und modernen Menschenaffen nahe stand. Seiner Ansicht nach könnte dieser Primat der erste Angehörige der menschlichen Stammlinie sein und damit der Urahn aller späteren Hominiden. Auch *Orrorin* und *Ardipithecus* würden dann von ihm abstammen (siehe Kasten Seite 54/55 oben rechts, linker Baum).

Falls diese These stimmt, wären die Hominiden über eine Million Jahre früher entstanden, als einige Berechnungen anhand molekularer Vergleiche ergaben. Noch revolutionärer wäre, dass die Evolution der Hominiden nicht in Ostafrika begonnen hätte, wie bisher viele Anthropologen vermuten. Der französische Forscher Yves Coppens entwarf dazu in den 1980er Jahren ein Modell, dem zufolge sich die Stammart von Mensch und den ihm nächsten Menschenaffen in zwei Populationen spaltete, als der große afrikanische Grabenbruch entstand. Die Population auf der Westseite lebte weiterhin im Regenwald, die im Osten passte sich an die Savannenlandschaft an (siehe seinen Artikel in Spektrum der Wissenschaft, 12/1994, S. 64).

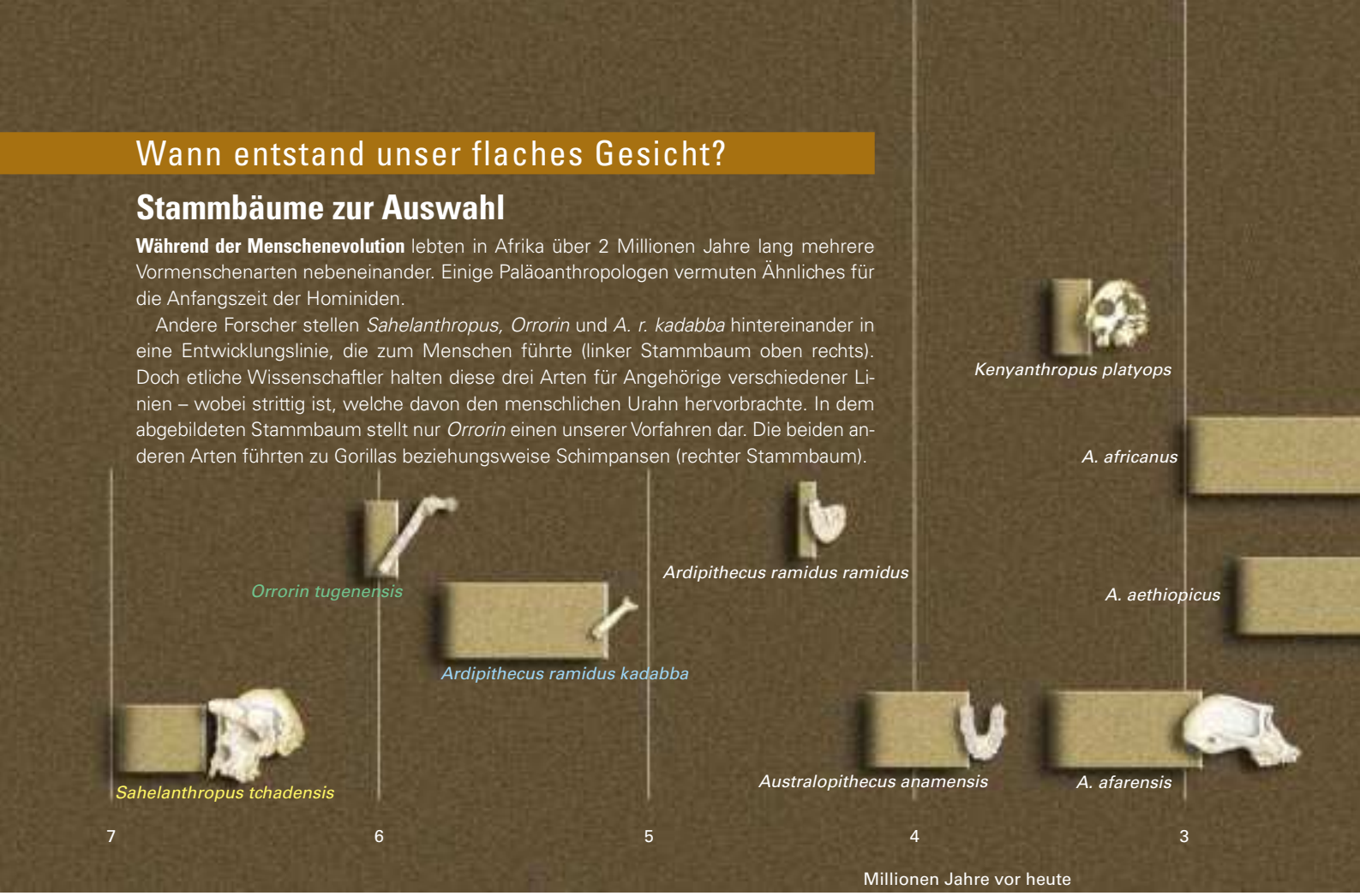
Seit einiger Zeit äußern manche Anthropologen an dieser Auffassung Zweifel. Sie schieben den Irrtum auf die karge Fundsituation von Fossilien aus der Frühzeit der Menschwerdung. Der Fundort im Tschad liegt 2500 Kilometer westlich vom afrikanischen Grabenbruch. Sollte dieser Primat wirklich ein früher Hominide gewesen sein, müssten die Forscher ein völlig neues Modell von deren Evolution entwerfen. ▷

Wann entstand unser flaches Gesicht?

Stammbäume zur Auswahl

Während der Menschenevolution lebten in Afrika über 2 Millionen Jahre lang mehrere Vormenschenarten nebeneinander. Einige Paläoanthropologen vermuten Ähnliches für die Anfangszeit der Hominiden.

Andere Forscher stellen *Sahelanthropus, Orrorin* und *A. r. kadabba* hintereinander in eine Entwicklungslinie, die zum Menschen führte (linker Stammbaum oben rechts). Doch etliche Wissenschaftler halten diese drei Arten für Angehörige verschiedener Linien – wobei strittig ist, welche davon den menschlichen Urahn hervorbrachte. In dem abgebildeten Stammbaum stellt nur *Orrorin* einen unserer Vorfahren dar. Die beiden anderen Arten führten zu Gorillas beziehungsweise Schimpansen (rechter Stammbaum).



▷ Die größte Überraschung bereitet das Aussehen von *Sahelanthropus*. Wenn dies unser Urahn war, hätte der letzte gemeinsame Vorfahre von Mensch und Schimpanse ein völlig anderes Gesicht gehabt, als es sich Anthropologen vorstellen. Nach bisheriger Auffassung besaß dieser Primat, ähnlich wie Schimpansen, eine stark vorspringende Schnauze, große Eckzähne und Backenzähne mit dünnem Zahnschmelz. Aber obwohl das neue Fossil durchaus Menschenaffenzüge aufweist, ist die Schnauze nur schwach ausgeprägt, die Eckzähne sind recht klein und die Backenzähne tragen dicken Schmelz. Dazu sind die Überaugenwülste dicker als bei heutigen Menschenaffen. »Wenn *Sahelanthropus* uns irgendetwas lehrt, dann, dass der letzte gemeinsame Vorfahr kein Schimpanse war«, bemerkt Tim White. »Aber war denn etwas anderes zu erwarten?« Schließlich hatten Schimpansen ebenso viel Zeit für ihre Evolution wie der Mensch. Erst während dieser Jahrmillionen entwickelten sie sich zu hoch spezialisierten, Früchte fressenden Menschenaffen.

Verschiedene von Brunets Kollegen bezweifeln, dass die Eckzähne des Fossils aus dem Tschad so viel Hominidenähnlichkeit haben. »Warum *Sahelanthropus* unbedingt ein Hominide sein soll, leuchtet nicht ganz ein«, meint etwa Carol V. Ward von der Universität von Missouri in Columbia.

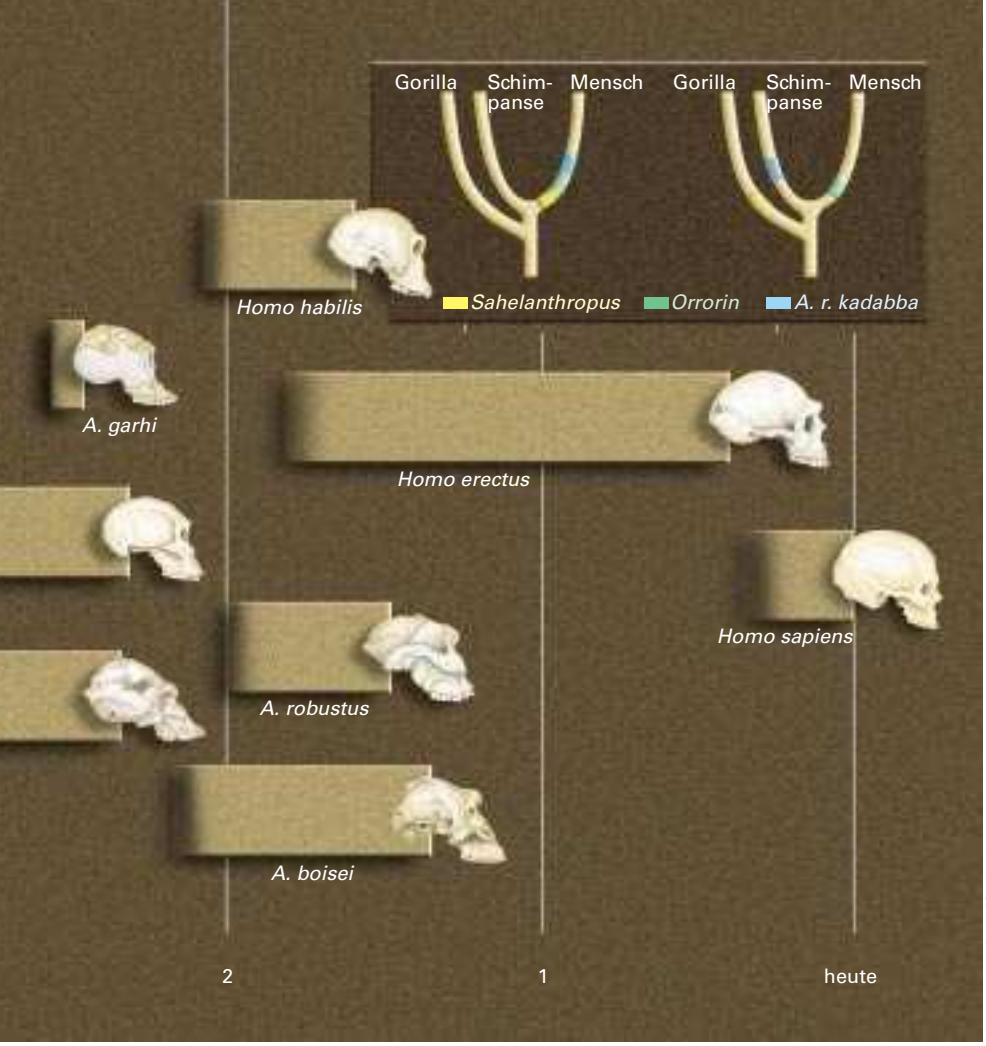
Neue Maßstäbe für die Hominidenevolution

Der Paläoanthropologe Milford H. Wolpoff von der Universität von Michigan hat seine Gegenargumente gemeinsam mit Pickford und Senut, die *Orrorin* entdeckten, im Oktober 2002 in der Zeitschrift »Nature« veröffentlicht. Diese Forscher halten *Sahelanthropus* für einen Menschenaffen. Verschiedene Schädelmerkmale würden auf einen Vierbeiner hinweisen, der sich von zäher Pflanzenkost ernährte. Die relativ kleinen Eckzähne könnten auf ein weibliches Tier hindeuten. Nach Pickford und Senut könnte es sich um eine Vorfahrin des Gorillas handeln.

Brunet reagierte bissig: Ähnlich hätte man Dart 1925 angegriffen, als er den ersten *Australopithecus* beschrieb. Überdies sei nicht verwunderlich, dass *Sahelanthropus* zu seiner Zeit auch noch deutlich menschenaffenähnliche Merkmale aufwies. Um nach einer eventuellen Verwandtschaft mit dem Menschen zu suchen, seien das die falschen Kriterien.

Dieser Streit rührt an einen wunden Punkt. Wodurch lassen sich Hominiden von den Menschenaffen abgrenzen? Nach den Erkenntnissen der Systematiker erkennt man die Angehörigen einer systematischen Gruppe daran, dass sie zumindest ein Merkmal gemeinsam haben, welches an der Basis dieses Taxons neu entstand und somit anderen Gruppen fehlt. Auch der älteste Vertreter der Gruppe muss es folglich zumindest in Ansätzen schon aufweisen. Für die Hominiden galt früher der aufrechte Gang als das entscheidende, sie charakterisierende Merkmal, in dem sich auch alle Vormenschen von den Menschenaffen abheben. Möglich erscheint nun aber, dass die Hominiden als wichtigste Charakteristika weniger augenfällige, vielleicht noch ältere Neuerungen teilen. Das könnten durchaus anders geformte Eckzähne und die damit einhergehenden anderen Gebissstrukturen sein.

Paläoanthropologen können für die systematische Zuordnung der Fossilien



PATRICIA J. WYNNE UND CORNELIA BUIK

nur Skelett- oder Schädelmerkmale hinzuziehen. Doch gerade von den mutmaßlichen frühesten Vormenschen – *Orrorin*, *A. r. kadabba* und *Sahelanthropus* gibt es bisher wenig vergleichbare Knochenstücke, denn die Fragmente stammen meistens von jeweils verschiedenen Körperteilen. Deswegen ist bisher kaum zu ermitteln, welches oder welche neuen anatomischen Merkmale diese Arten gemeinsam aufwiesen – welche neuen Eigenschaften also unser Urahn besaß, als sich dessen Linie von den Menschenaffen abzweigte. Aus diesem Grund ist bisher ungewiss, ob zuerst die Eckzähne kleiner wurden oder ob zuerst der aufrechte Gang entstand. Erwogen wird inzwischen sogar, dass der aufrechte Gang gar kein exklusives Merkmal der Hominiden darstellte, sondern auch bei manchen früheren Menschenaffen vorkam.

Seit einiger Zeit führen die Paläoanthropologen hitzige Debatten darüber, wie stark der Hominidenstammbaum verzweigt war. Die drei neuen mutmaßlichen Vormenschen aus der Frühzeit stacheln diese Diskussionen noch mehr an. Dass vor 3 bis 1,5 Millionen Jahren zumindest zeitweise mehrere Vormenschenarten nebeneinander lebten, ist inzwischen unstrittig – wenn auch die Meinungen weit auseinander gehen, wie viele Arten es waren (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2000, S. 46). Nun verlautet von einigen Seiten, schon die Anfänge der Hominidenevolution gestalteten sich vielleicht bunter als gedacht. David Begun erforscht die Evolution der Menschenaffen, aus denen die Ahnen der modernen afrikanischen Vertreter und die Vorfahren der Hominiden hervorgingen. Seines Erachtens entwickelten sich diese Vorfahren vor rund 15 bis 10 Millionen Jahren, im mittleren Miozän, in Europa und Westasien. Erst später gelangten sie wieder nach Afrika, woher sie ursprünglich stammten.

Neues Szenario Artenexplosion

Laut Begun ist ein Merkmalsmosaik wie bei *Sahelanthropus* zu erwarten, wenn sich Tiere in einem neuen Lebensraum ausbreiten und dabei rasch etliche neuen Arten ausbilden. »Ich wäre nicht überrascht, wenn für diese Zeit 10 oder 15 Affengattungen auftauchen, die dem Menschen näher stehen als den Schimpansen«, meint er denn auch. Bernard Wood von der George-Washington-Universität (Washington DC) ging in seinem Begleitkommentar zu Brunets Artikel in der Zeitschrift »Nature« noch weiter. Er erwägt einen Vergleich mit der Explosion der Tierwelt im Kambrium, aus der fast alle großen heutigen Tierstämme hervorgingen. Entsprangen die vielen frühen Arten, die als Hominiden gelten, verschiedenen Linien? Sah dieser Stammbaum an der Basis eher aus wie ein dichtes Gebüsch statt wie ein Baum? Dann wäre zu vermuten, dass die meisten, wenn nicht alle bisherigen Funde aus dieser Zeit zu Zweigen gehören, die sich später nicht weiter fortsetzten.

Andere Forscher, darunter Tim White, halten eine solche Deutung für vorschnell. Wie White und Brunet betonen, kennt man für den Abschnitt vor 7 bis 4 Millionen Jahren von den einzelnen Zeitpunkten jeweils nur eine Hominidenart. Selbst vor 2 Millionen Jahren, in der Phase größter Hominidenvielfalt, hätten nicht mehr als drei Arten gleichzeitig existiert. Nach Whites Ansicht könnten die neuen Funde durchaus in dieselbe Abstammungslinie gehören. Dann wären *Sahelanthropus* und *Orrorin* in Wahrheit frühe Arten der Gattung *Ardipithecus*.

Um Klarheit zu erhalten, wären vor allem mehr Fossilien erforderlich. Die Forscher wissen aber auch, dass es umso schwieriger ist, einen Fund als Hominidenfossil einzustufen, je näher die Art dem letzten mit den Menschenaffen gemeinsamen Vorfahren steht. Manche der Anthropologen glauben, dass die Suche jetzt erst richtig beginnen wird – gerade weil sie dem ersten Hominiden noch nie so nah waren. ◁

Kate Wong ist Wissenschaftsautorin und Redakteurin von Scientific American.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

Vom Affen zum Menschen. Teil II: Evolution des Menschen. Von Louis de Bonis. Spektrum der Wissenschaft, Compact 1, 2002.

A New Hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa. Von Michael Brunet et al. in: Nature, Bd. 418, S. 145, 11. Juli 2002.

Bipedalism in *Orrorin tugenensis* Revealed by its Femora. Von Martin Pickford et al. in: Comptes Rendus: Palevol, Bd. 1, S. 1, 2002.

Late Miocene Hominids from the Middle Awash, Ethiopia. Von Yohannes Haile-Selassie in: Nature, Bd. 412, S. 178, 12. Juli 2001.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Der Autofokus

Von Bernhard Gerl

Schade, wenn das Ferienfoto nur schemenhaft erahnen lässt, woran man sich so gern erinnern würde. Entscheidend für ein gutes Foto wäre die richtige Brennweiteneinstellung gewesen. Nur wenn das Motiv im Fokus des Linsensystems liegt, wird es scharf abgebildet. Doch heutzutage sind verschwommene Bilder die Ausnahme, denn meist übernimmt die Kameraelektronik das Scharfstellen. Sie wertet das Licht aus, das durch einen oder mehrere Bildbereiche einfällt. Diese sind im Sucher durch Rahmen markiert. Bei hochpreisigen Geräten zeigen zum Beispiel Leuchtdioden an, auf welchen Ausschnitt die Kamera gerade scharf stellt.

Zwei Autofokusverfahren haben sich durchgesetzt. In beiden fungieren Zeilen aus mehreren hundert lichtempfindlichen Halbleiterelementen (*Charge-Coupled Devices*, CCDs) als Sensoren und werten ähnlich den Sinneszellen der Netzhaut die Lichtintensität aus.

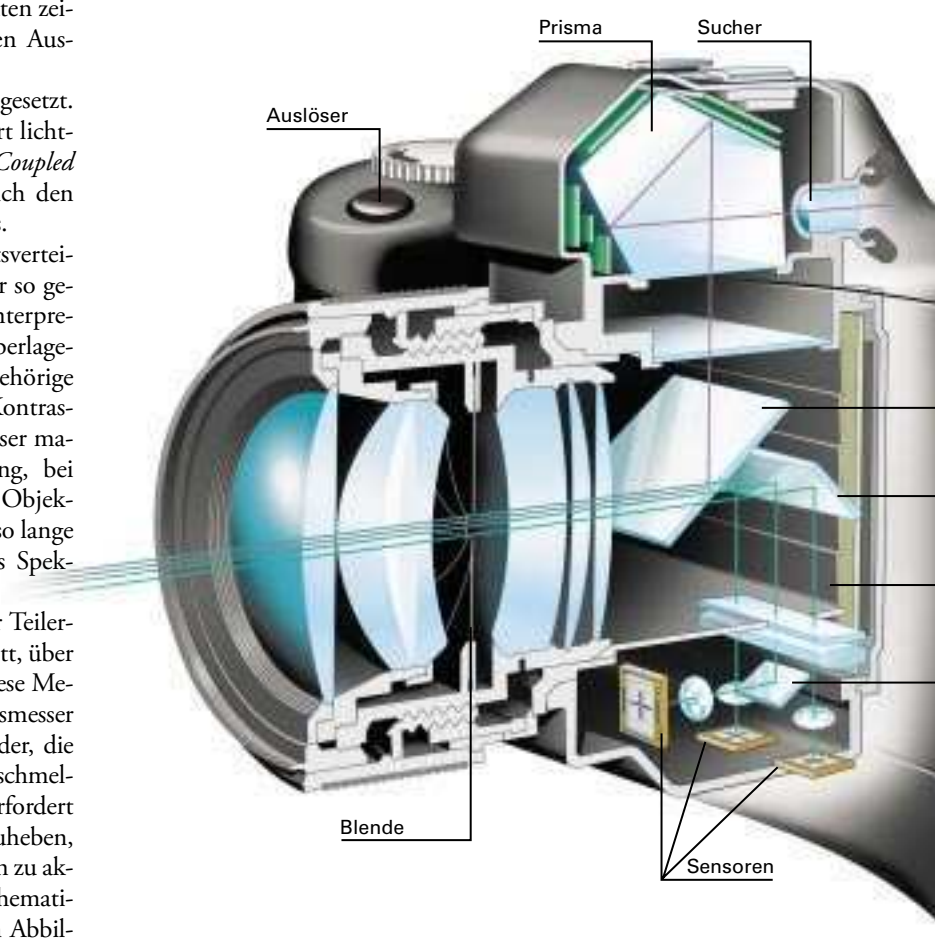
Relative Verfahren analysieren die Helligkeitsverteilung im gewünschten Bildausschnitt mithilfe der so genannten schnellen Fourier-Transformation. Sie interpretiert das Intensitätsmuster als Ergebnis einer Überlagerung von Sinusfunktionen und ermittelt das zugehörige Frequenzspektrum. Denn Unschärfe verringert Kontraste und verschmiert Kanten, das entspricht in dieser mathematischen Darstellung einer Tiefpassfilterung, bei der hohe »Frequenzen« im Spektrum fehlen. Das Objektiv der Kamera wird deshalb von der Automatik so lange schrittweise verstellt, bis sie ein optimal breites Spektrum ermittelt hat.

Spiegelreflexkameras arbeiten meist mit einer Teileroptik, die das Licht, das durch das Objektiv eintritt, über Linsen auf zwei Reihen von CCDs projiziert. Diese Methode hat hier Tradition: Schnittbild-Entfernungsmesser zeigen beim Bild durch den Sucher zwei Teilbilder, die bei optimaler Scharfeinstellung zu einem Bild verschmelzen. Die elektronische Version dieses Verfahrens erfordert eine Filterung der Daten, um Kanten hervorzuheben, also das Helligkeitsmuster der beiden Sensorreihen zu akzentuieren. Die Elektronik kann dann mit mathematischen Verfahren bestimmen, wie weit die beiden Abbilder auf den Sensorzeilen voneinander entfernt liegen. Diese Distanz wird gemäß dem konstruktionsbedingten Optimum korrigiert.

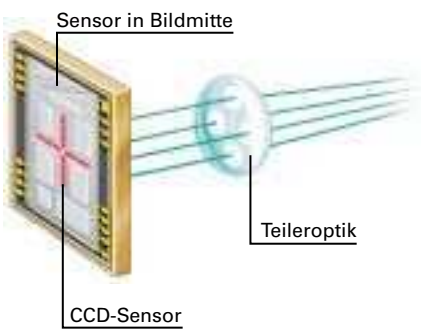
Wichtig ist, dass die gemessenen Lichtintensitäten nicht zu gleichmäßig verteilt sind. Bei Kreuzanordnung der Sensorzeilen ist es zwar unwichtig, ob die Strukturen im Bild waagrecht oder senkrecht verlaufen. Gibt es jedoch keine markanten Änderungen in Helligkeit und Kontrast, dann funktioniert auch der Autofokus nicht. Probleme bereiten umgekehrt auch regelmäßige Streifenmuster, wie sie ein Gitter oder Zaun aufweist, da dann die Kameraelektronik kein eindeutiges Ergebnis findet. ◁

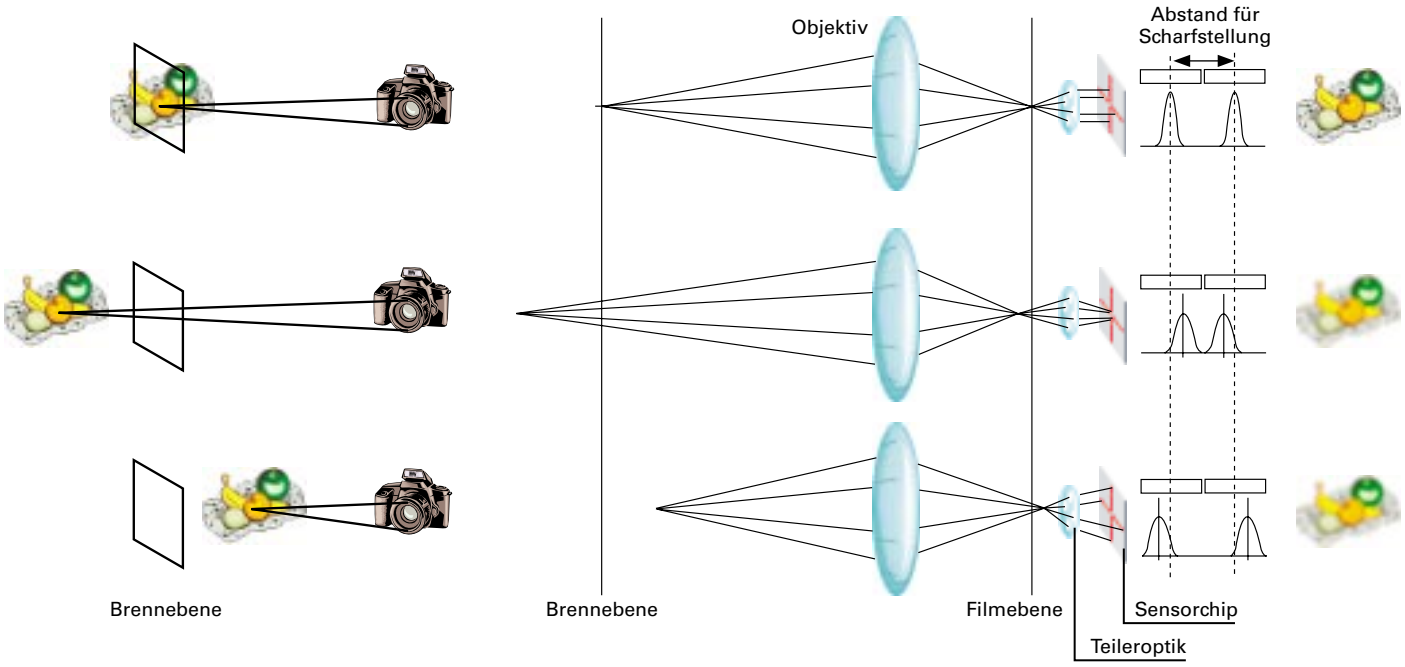
Bernhard Gerl ist Fachautor in Regensburg. Er dankt Hans Burkhardt vom Institut für Informatik der Universität Freiburg.

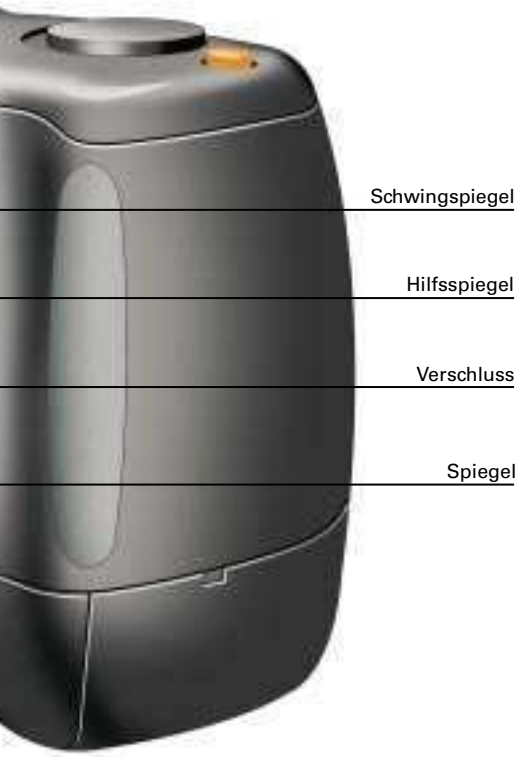
Von einem Punkt des Motivs gehen Lichtstrahlen durch die obere und untere Hälfte des Objektivs. Genau in dessen Filmebene liegt eine Linse. Befindet sich das Objekt in der Fokusebene vor der Kamera, so gehen die Lichtstrahlen ungebrochen durch das Zentrum der Linse hindurch und werden von einer weiteren Doppellinse im optimalen Abstand auf die beiden CCD-Sensorzeilen projiziert. Liegt das Objekt aber vor oder hinter der Fokusebene, so ist die Projektion nach außen oder zur Mitte hin abgelenkt.



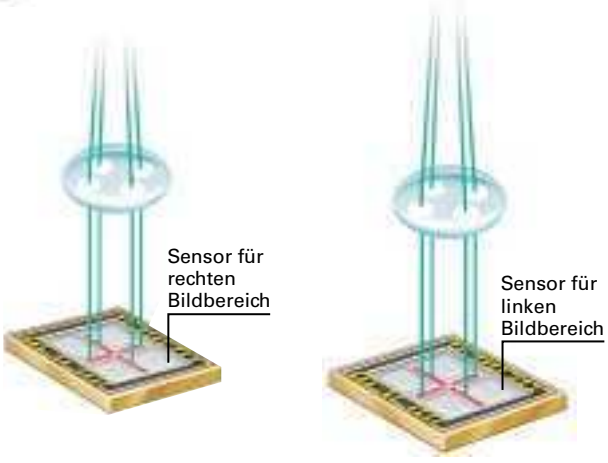
Verfügt ein Autofokusmodul über mehrere Paare gekreuzter CCD-Sensorzeilen, jede mit dazugehöriger Teileroptik, kann die Kamera auf Gegenstände in verschiedenen Bildfeldern scharf stellen. Die Elektronik wählt dann dasjenige aus, das deutlich näher liegt, wahrscheinlich also das Motiv enthält.







Hochwertige Spiegelreflexkameras verknüpfen den Autofokus mit anderen Funktionen, beispielsweise mit einer Spot-Belichtungsmessung im Messfeld.



WUSSTEN SIE SCHON?

▶ Hochwertige Spiegelreflexkameras haben einen **kontinuierlichen Autofokus**. Er erlaubt scharfe Bilder von einem Motiv, das sich auf die Kamera zu oder von ihr weg bewegt. Wenn der Auslöser halb gedrückt wird, stellt der Autofokus auf das Motiv scharf und beginnt es zu verfolgen. Wird der Auslöser ganz durchgedrückt, verfolgt er den Gegenstand noch bis zu dem Augenblick, in dem sich der Verschluss wirklich öffnet, was bis zu einer Viertelsekunde dauern kann.

▶ Auch **Digitalkameras** verwenden den passiven Autofokus zum Scharfstellen. Bei ihnen werden die Teilbilder direkt von den Sensoren ausgewertet, die später auch die eigentlichen Bildinformationen aufnehmen. Allerdings muss der Verschluss der Kamera dazu zweimal öffnen, das erfordert eine gewisse Zeit.

▶ Neben dem passiven Autofokus, der nur das Licht auswertet, das vom Motiv kommt, gibt es auch die aktive Variante, mit der nichtdigitale Sucherkameras arbeiten. Die Kamera sendet **Ultraschall- oder Infrarotsignale** aus und misst die reflektierte Strahlung. Die Entfernung des Motivs kann anhand des bekannten Abstands von Sender und Empfänger auf der Kamera durch eine Dreiecksgleichung berechnet werden (trigonometrische Entfernungsmessung). Andere Modelle bestimmen wie ein Radargerät oder ein Echolot die Zeit, die der Messstrahl von der Kamera bis zum Motiv und wieder zurück braucht.

ILLUSTRATION: GEORGE RETSECK

Von Erich Kasten und Bernhard A. Sabel

Mit stechenden Kopfschmerzen auf der linken Seite wacht Alfred M. auf. Er will die Nachttischlampe anknipsen, doch die scheint kaputt zu sein. Im Zimmer kann er alles nur dunkel und verschwommen erkennen. Obwohl ihm sehr schwindelig ist, quält er sich schließlich aus dem Bett – und stößt sich die rechte Schulter heftig am Türrahmen. Da erst merkt er, dass er weder den rechten Arm noch das rechte Bein sieht, egal, welches Auge er benutzt. Bewegt er die rechte Hand vor sich hin und her, taucht sie plötzlich von rechts her mitten vor ihm auf wie aus dem Nichts.

Der Arzt diagnostiziert bei dem Mittfünfziger eine Halbseitenblindheit, ausgelöst durch einen Hirninfarkt. Auf dem rechten wie auf dem linken Auge fehlt jeweils die komplette rechte Hälfte des Gesichtsfelds. Solche Ausfälle von mehr oder minder großen Bereichen des Sehfelds eines oder beider Augen können bei verschiedenartigen Gehirnschädigungen auftreten, außer nach Schlaganfällen etwa auch bei Hirnverletzungen oder durch Tumoren. Je nachdem, an welcher Stelle im Gehirn der Defekt die Zellen oder Bahnen des Sehsystems beeinträchtigt, lässt er sich auf einem oder beiden Augen nachweisen (siehe Bild Seite 61).

Obwohl sich der Zustand etwa nach einem Hirninfarkt oft anfänglich von selbst bessert, bleiben die Patienten zumeist schwer behindert. Gerade wenn ein großer Teil des zentralen Gesichtsfelds einfach fehlt – in dem man normalerweise scharf sieht und auf den man den Blick richtet –, ist die Orientierung im Alltag äußerst mühsam und unfallträchtig. Vielen Patienten mit kompletter Halbseitenblindheit fällt auch das Lesen schwer, weil bei ihnen stets eine Hälfte der Wörter verschwindet. Leider kennen Ärzte, sofern sich der Gehirnschaden nicht medizinisch mildern lässt, bisher praktisch keine Therapie, um den Patienten wieder zu einem größeren Gesichtsfeld zu verhelfen. Betroffene können höchstens lernen, den Ausfall durch Augen- und Kopfbewegungen etwas auszugleichen.

Sehtraining bei Teilblindheit

Manchen Hirngeschädigten mit eingeschränktem Gesichtsfeld können spezielle Übungen helfen, von ihrer Umwelt wieder einen größeren Ausschnitt zu sehen. Das Sinnessystem erwies sich selbst bei Erwachsenen als unerwartet lernfähig.

Fehlt das halbe Gesichtsfeld, läuft der Betroffene ständig Gefahr, mit irgendetwas zusammenzustoßen. Im hier nachempfundenen Fall sieht der Patient rechts zumindest noch im Zentrum seines Gesichtsfelds etwas.

ZEFA

An der Universität Magdeburg entwickeln wir seit längerem Therapien für hirnorganisch bedingte Sehschäden. Mit einem speziellen computergestützten Sehtraining konnten wir in den letzten eineinhalb Jahrzehnten mehrere hundert Betroffene so behandeln, dass ihr Gesichtsfeld sich wieder erweiterte. Viele dieser Behandelten empfinden die Verbesserung als deutlichen Gewinn, insbesondere wenn sie im zentralen Sehfeld liegt. Sie fühlen sich dadurch beim Hantieren und Umhergehen sicherer als vorher. Manche trauen sich sogar wieder zu, Fahrrad zu fahren, oder können besser lesen.

Für verschiedene andere neurologische Defekte, etwa des Sprachvermögens oder der Bewegungskontrolle, existiert schon länger eine Reihe von recht erfolgreichen Behandlungsmethoden. Gerade das Sehsystem aber – wie auch einige andere Sinnessysteme – galt beim Erwachsenen bis vor kurzem als für zu fest verschaltet, als dass es größere Ausfälle nennenswert kompensieren könnte. Erst in den letzten drei Jahrzehnten begann sich allmählich abzuzeichnen, dass diese Auffassung offenbar so streng nicht zutrifft. Einzelne medizinische Beobachtungen und vor allem Tierversuche zeigten auf, dass auch ausgereifte Sinnessysteme in gewissem Grade noch »plastisch« sind und sich auf neue Bedingungen einstellen können. Solche Hinweise fanden sich zunehmend auch für das Sehen. So hatten Tierstudien erwiesen, dass sich ein Sehvermögen durchaus nachträglich aufbauen lässt, auch wenn die Entwicklung gestört wurde.

Lohn langwierigen Sehtrainings

Wenn etwa die Funktion des einen Auges bei jungen Tieren ausfiel, weil es gleich nach der Geburt eine Zeit lang abgedeckt gewesen war und die Sehrinde – das Sehzentrum in der hinteren Hirnrinde – deswegen teilweise verkümmerte, können die Tiere später durch systematisches Training trotzdem lernen, mit diesem Auge wieder etwas zu erblicken. Sie können das Auge sogar mit dem anderen koordinieren. Auch im Erwachsenenalter entstandene Läsionen in der Sehrinde, ▷

▷ die zunächst Blindheit in einer Gesichtsfeldhälfte bewirken, kann das Gehirn unter Umständen ausgleichen. Als Folge gezielter Übungen schauten die Tiere nach ein paar Wochen mit dem Auge wieder zu Lichtpunkten, sogar wenn diese recht schwach waren. Schon Mitte der 1980er Jahre gab es auch Hinweise darauf, dass das menschliche Sehsystem Erwachsener anpassungsfähiger reagiert, als Neurowissenschaftler früher geglaubt hatten. Sogar Schäden blieben offenbar nicht völlig starr bestehen. Dennoch reagierten die meisten unserer Fachkollegen zunächst äußerst skeptisch auf unsere erste Studie mit auf beiden Augen teilblinden Patienten, die wir zusammen mit Fritz Schmielau von der Universitätsklinik Lübeck von 1989 bis 1992 durchführten.

Die elf Teilnehmer mussten dafür sehr viel Zeit und Geduld aufbringen. Sie trainierten zu Hause wenigstens ein halbes Jahr lang täglich zweimal für eine halbe Stunde mit einem Heimcomputer. Ein auf jeden Patienten individuell abgestimmtes Programm konfrontierte sie bei jeder Sitzung viele hundert Mal mit einzelnen Lichtpunkten am Bildschirm. Besonders im Grenzbereich zwischen dem funktionstüchtigen und dem blinden Gebiet des Gesichtsfelds erzeugte das Programm systematisch Lichtreize (siehe Bild unten). Bei neun dieser Personen vergrößerte sich das Gesichtsfeld im Verlauf dieser Monate tatsächlich messbar.

Diese erste orientierende Studie hatten wir nicht nach strengen wissenschaftlichen Kriterien durchgeführt, wie unsere Kritiker denn auch monierten. Sie bemängelten unter anderem, dass wir im Gegenversuch nicht zugleich Teilnehmer getestet hatten, die nur scheinbar das gezielte Sehtraining absolvierten – wobei weder der Experimentator noch die Patienten wussten, welche Probanden mit dem echten Programm üben. Außerdem war bei einigen Mitwirkenden möglicherweise die Phase, in der sich das Sehvermögen noch von allein wieder verbessert, nicht völlig abgeschlossen. Sie kann manchmal bis zu einem Jahr währen.

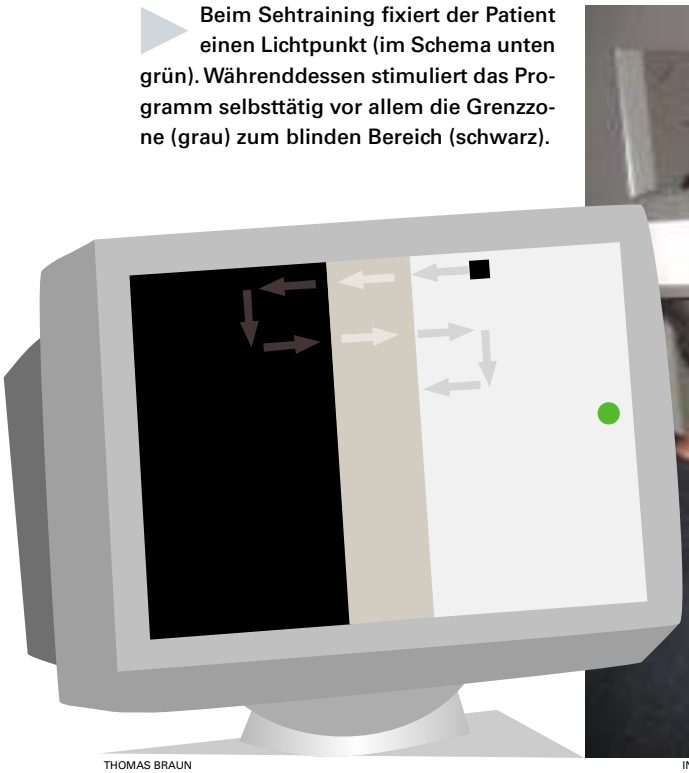
Doppelblindversuch als Bewährungsprobe

So wiederholten wir die Prozedur Mitte der 1990er Jahre mit 19 neuen Teilnehmern, diesmal unter den geforderten Bedingungen. Wir wählten wieder Patienten aus, die einen Gesichtsfeldausfall aufwiesen, der in gleicher Größe und Form auf beiden Augen nachweisbar war. Erfreulicherweise ergab sich auch diesmal, dass sich das Gesichtsfeld eines Großteils der trainierten Patienten um mehrere Winkelgrade erweitert hatte. Dagegen hatte sich bei den Teilnehmern der Scheinübungen – in dem Fall eine Schulung des Fixationsvermögens und der Augenbewegungen – der blinde Bereich im Durchschnitt sogar noch ein wenig vergrößert. (Diesen Personen boten wir anschließend das gleiche Training an wie der anderen Hälfte der Gruppe.)

Neurowissenschaftler interessiert an diesem Ergebnis insbesondere, was durch das Training eigentlich im Gehirn geschieht. Wie unser Sehsystem anatomisch aufgebaut ist, wo die Nervenbahnen verlaufen oder wo die Verarbeitungszentren für visuelle Informationen liegen und wie sie miteinander verknüpft sind, ist mittlerweile recht genau bekannt. Trotzdem wissen wir nicht wirklich, wie eine Wahrnehmung letztlich zu Stande kommt. Zu verstehen, wieso und durch welche Mechanismen Sinnesereignisse im visuellen System auch noch nach der Kindheit relativ große Veränderungen der Verschaltungen hervorrufen – also auf eine Bereitschaft zur Plastizität stoßen –, dürfte hilfreich sein, um die Funktionsweise dieses Wahrnehmungssystems zu begreifen. Dazu könnten Studien wie unsere Hinweise liefern.

Als wir das Trainingsprogramm konzipierten, bauten wir auf früheren Beobachtungen anderer Forscher auf. Der Neuropsychologe Ernst Pöppel von der Universität München hatte schon in den

Beim Sehtraining fixiert der Patient einen Lichtpunkt (im Schema unten grün). Währenddessen stimuliert das Programm selbsttätig vor allem die Grenzzone (grau) zum blinden Bereich (schwarz).



THOMAS BRAUN

INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE PSYCHOLOGIE, UNIVERSITÄT MAGDEBURG

1970er Jahren entdeckt, dass das funktionstüchtige Gesichtsfeld Halbseitenblinder, bei denen die Behinderung auf eine Hirnschädigung im Erwachsenenalter zurückgeht, in der Größe stets etwas schwankt. Es verändert sich sowohl über den Tag als auch über das Jahr. Bei einem Patienten war es etwa in den Sommermonaten deutlich größer als im Winter.

Einige Jahre später registrierte Josef Zihl von der Universität München verblüfft, dass sich bei solchen Patienten die Grenze zwischen sehendem und blindem Bereich nach aufwendigen und wiederholten Gesichtsfeldmessungen mit Lichtpunkten offenbar auch längerfristig verändern kann. Weil er das Grenzfeld genau bestimmen wollte, unterzog er die Patienten einer Anzahl langwieriger Sitzungen. Doch jedes Mal, wenn ein Patient zum nächsten Test erschien, hatte sich dessen Gesichtsfeld etwas in den blinden Bereich hinein erweitert. Als Schmielau dieses Phänomen einige Jahre später gezielt mit mehreren Patienten prüfte, kam er zum gleichen Resultat.

Pöppel und Zihl hatten sehr zeitaufwendig noch mit einer Apparatur gearbeitet, bei der jeder Lichtpunkt einzeln per Hand eingestellt wird. Dieses so genannte »Tübinger Perimeter« verwenden Augenärzte noch heute, um das Gesichtsfeld von Patienten auszumessen. Allerdings ist es bei modernen Geräten automatisiert. Der Patient sitzt dabei dicht vor einem kleinen halbkugelförmigen Schirm von etwa siebzig Zentimeter Durchmesser. Das Kinn liegt fest in einem Gestell, und die Person muss mit einem Auge einen bestimmten Punkt in der Mitte des Schirms fixieren, während einzelne Lichtpunkte irgendwo in der Halbkugel auftauchen. Das andere Auge wird währenddessen abgedeckt. Der Getestete gibt jeweils an, wann ein Lichtfleck von der Peripherie her in seinem Blickfeld erscheint. Dabei lassen sich sowohl Intensität als auch Größe der Lichtflecken variieren. Gesunde erblicken dabei in der Peripherie Lichtpunkte bis zu sechzig oder siebzig Grad vom fixierten Punkt. Zur Schläfe hin können dies bis zu neunzig Grad sein.

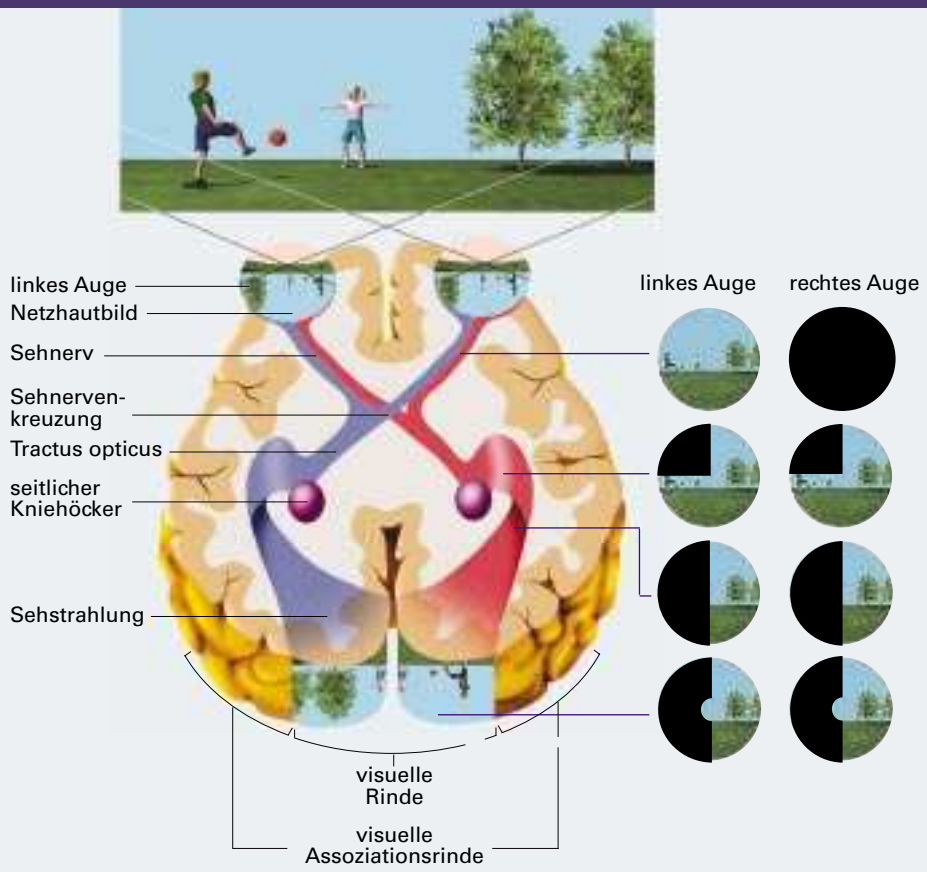
Dieses Gerät ersetzt bei unserem Training ein PC mit einem gewöhnlichen Computer-Bildschirm. Zum einen kann der Patient damit auch zu Hause alleine üben. Zum anderen erlaubt diese Vorgehensweise eine mehrfach höhere Auflösung der Lichtpunkte, also ein Abtasten in viel engeren und genaueren Schritten als mit dem Perimeter. Der Bildschirm deckt zwar einen kleineren Ausschnitt des Gesichtsfelds ab als das übliche Perimeter, doch er erfasst dessen zentralen und damit wichtigsten Teil. Wenn hiervon einiges fehlt, behindert schon ein kleiner Defekt den Patienten stark. Ein anderer Vorteil ist, dass das von uns entwickelte Programm die meisten Lichtpunkte automatisch an der Grenze zwischen sehendem und blindem Feld setzt und sie dort am dichtesten produziert. Auch die Lichtstärke und -dauer kann es bedarfsgerecht variieren. So schult es diesen Randbereich am intensivsten. Die Bereiche beidseits der Grenze fährt es in größeren Schritten ab.

Eine erste Version dieser Software entwickelte einer von uns (E. Kasten) Ende der 1980er Jahre zunächst am C64, später unter MS-DOS. Inzwischen existiert mit dem NovaVisions-Programm die vierte Version einer mit Windows kompatiblen Software. Das Programm speichert alle Übungsdaten. Es prüft auch die Fixationsfähigkeit und hält die Leistungen des Patienten fest. So konnten wir monatlich eventuelle Fortschritte erfassen und die Software Schritt für Schritt neu auf den Patienten einstellen.

Computerprogramm für Heimtraining

Am Ende der zweiten Studie war das Gesichtsfeld der trainierten Patienten im Mittel um 4,9 Grad größer geworden. Sie sahen die Lichtreize an durchschnittlich 7,8 Prozent mehr Positionen des Bildschirms als vor dem Training. Dieser Zuwachs verteilte sich allerdings über die trainierten Teilnehmer nicht gleichmä- ▷

Die Stationen der Sehbahn

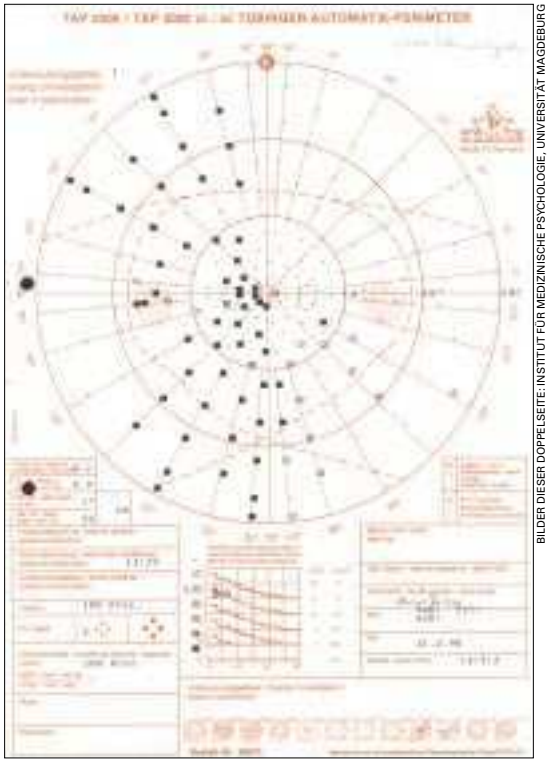


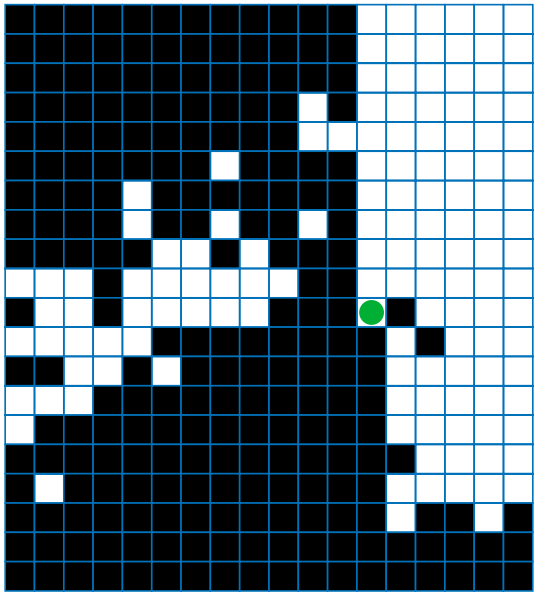
THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Defekte des Gesichtsfelds fallen, je nachdem an welcher Stelle die Sehbahn geschädigt ist, anders aus. Nach einer schweren Läsion des Sehnervs etwa kann der Patient auf dem einen Auge völlig blind sein. Eine auf beiden Augen gleiche totale Halbseiten-Teilblindheit tritt auf, wenn die Läsion die Sehstrahlung einer Gehirnseite betrifft. Hingegen bedeutet eine Schädigung der Sehrinde meist, dass der Patient im Zentrum des Gesichtsfelds auf der blinden Seite doch noch etwas sieht.

▷ ßig. Rund zwei Drittel von ihnen konnten ihre Leistungen klar verbessern: Zwei Patienten hatten sogar einen Zuwachs von 15 beziehungsweise 21 Prozent. Bei einem Drittel jedoch wuchs das Gesichtsfeld trotz Training nicht oder kaum nennenswert. Lediglich ein Teilnehmer der Trainingsgruppe hatte sich um zwei Prozent verschlechtert.

Wie waren die Trainingserfolge zu erklären? Eine Reihe von Forschungsergebnissen hilft, diese Plastizität des Sehsystems zu deuten. Bereits 1980 hatte Ulf Eysel von der Universität Bochum erstmalig nachweisen können, dass Zellen der Sehrinde nach Gehirnläsionen ihr rezeptives Feld (ihr Einzugsgebiet von der Netzhaut) vergrößern. In den 1990er Jahren zeigten Eysel und seine Mitarbeiter in weiteren Tierstudien, dass diese Gehirnzellen ihr Einzugsgebiet auch dann ausdehnen, wenn man sie nicht nur direkt, sondern zusätzlich noch nahe neben ihrem Zuständigkeitsbereich in geeigneter Weise stimuliert. Binnen Minuten antworten sie dann auf die Erregung eines größeren Bereichs auf der Netzhaut und behalten das für mehrere Stunden bei. Offenbar konnten die Nervenzellen der Hirnrinde ihren Einzugsbereich infolge der neuen Beanspruchung sofort etwas vergrößern. Zudem gelang es damals Manfred Fahle von der Universität Bremen, bei Personen mit gesundem Sehvermögen einzelne Stellen des Gesichtsfelds auf überscharfes Sehen zu schulen – was an das »Adlerauge« von Naturvölkern erinnern mag. Interessanterweise übertrug sich die neue Leistung nicht auf andere Reize, sondern blieb rein auf die Übungsaufgabe beschränkt – etwa darauf zu erkennen, welche von zwei Linien eine winzige Verschiebung zeigte.





BILDER DIESER DOPPELSEITE: INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE PSYCHOLOGIE, UNIVERSITÄT MAGDEBURG

Das obere Messprotokoll des Gesichtsfelds einer Halbseitenblinden wurde mit einem üblichen Perimeter erstellt, das untere am Monitor. Der Bildschirm erfasst nicht das komplette Gesichtsfeld, lässt aber genauer erkennen, welche Bereiche der blinden linken Seite noch reagieren (grün: Fixationspunkt).

»Blindsehen«: Sehen, ohne zu sehen

Auch Forschungen zum so genannten Blindsehen lieferten neue Erkenntnisse. Pöppel hatte das Phänomen bei Untersuchungen von Teilblinden mit defekter Sehrinde entdeckt. Wie er herausfand, nehmen manche der Betroffenen im an sich blinden Bereich doch noch etwas wahr, ohne dass ihnen dies allerdings bewusst wird. Ohne zu wissen warum, raten sie viel öfter als zufällig richtig, wenn sie sagen sollen, ob dort ein Lichtpunkt aufleuchtete oder nicht. In den letzten zwei Jahrzehnten stellte sich heraus, dass diese Wahrnehmung sogar wieder bewusst werden kann, wenn man sie intensiv schult. Dies gelang Petra Stoerig von der Universität Düsseldorf (siehe ihren Artikel »Blindsehen« in »Gehirn&Geist« 2/ 2003, S. 76).

Zunächst suchten Gehirnforscher das Blindsehen damit zu erklären, dass normalerweise ein Teil der visuellen Information nicht zur Hirnrinde gelangt, sondern ins Stammhirn, also in ältere Gebiete für die visuelle Verarbeitung, welche zum Beispiel reflexhafte Augenbewegungen beisteuern. Die betreffende Verzweigungs- und Verschaltungsstelle beider Gehirnhälften liegt am Ende des Sehnervs im seitlichen Kniehöcker *(Corpus geniculatum laterale)* – etwa auf halber Strecke zwischen Auge und Sehrinde. Nach jener Hypothese würde bei Teilblinden das Mittelhirn noch visuelle Information erhalten, aber die Sehrinde keine mehr, weil diese oder die direkt zu ihr führenden Bahnen lädiert sind.

Doch Mark Wessinger und Robert Fendrich von der Universität von Kalifornien in Davis entdeckten 1992, dass bei manchen Betroffenen im blinden Bereich der Sehrinde noch kleine Inseln unversehrter Zellen vorhanden sind. Sie schlossen daraus, dass innerhalb des geschädigten Areals noch winzige Sehreste existieren können. Allerdings sind diese offenbar zu klein und damit zu schwach, um visuelle Eindrücke weiterzuleiten und bis ins Bewusstsein zu heben. Diese These unterstützen Ergebnisse unseres ehemaligen Mitarbeiters Stefan Wüst. Er wies nach, dass Blindsehen auch bei Patienten mit geschädigtem Sehnerv vorkommt. Bei diesen Patienten dürfte das Mittelhirn genauso mangelhaft, wenn überhaupt, versorgt werden wie die Sehrinde. In dem Fall erhalten über den defekten Sehnerv zu wenige Zellen der Rinde noch einen Input, um eine bewusste Wahrnehmung zu erzeugen.

Wir unterscheiden heute drei Arten von Reststrukturen in der ansonsten blinden Sehrinde. Erstens gibt es die »Makro-Inseln«. Das sind größere zusammenhängende Bereiche im blinden Areal – Flecken, wo der Patient noch zuverlässig Licht, Formen und Farben bewusst wahrnimmt. Zweitens können »Mikro-Inseln« existieren. Sie sind viel kleiner. An diesen Stellen sehen Patienten hin und wieder noch einen Lichtpunkt. Die Wahrnehmung wiederholt sich jedoch nicht zuverlässig und das Licht muss meistens relativ stark sein. Drittens gibt es einen »Übergangsbereich«: Dort liegen offenbar in der Randzone des zerstörten Gewebes häufig noch ein paar funktionstüchtige Zellen. Das kann der Rand einer Makroinsel sein oder auch die

Grenze des blinden Feldes. Auch in diesem Grenzgebiet erkennen Patienten Lichtreize nur manchmal – was wir bei unseren Versuchen aber ausnutzten.

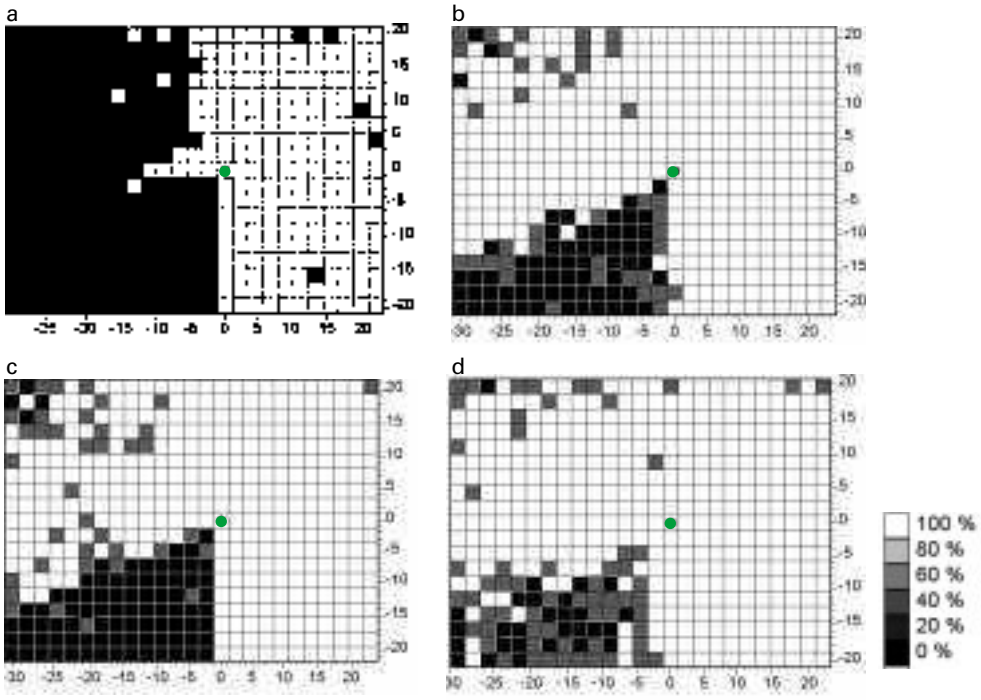
Noch eine Beobachtung verdient Beachtung. Sonderbarerweise sind sich Teilblinde des fehlenden Bereichs ihres Gesichtsfelds an sich oft gar nicht bewusst. Der Teil ist nicht schwarz, sondern fehlt schlichtweg und wird beim Sehen selbst eigentlich gar nicht vermisst. Erst wenn die Patienten mit jemandem zusammenstoßen oder gegen Möbel rennen, merken sie, dass etwas nicht stimmt. Offenbar stört sich das Gehirn an dem Gesichtsfeldausfall nicht. Kleinere fehlende Flecken scheint es überdies von allein mit Information aus der unmittelbaren Umgebung des Areals zu füllen. Das geschieht ganz offenkundig auch mit dem so genannten Blinden Fleck, dem »Loch« in der Netzhaut, wo der Sehnerv austritt. Auch den Blinden Fleck können wir sogar beim Sehen mit einem Auge nur mit Tricks wahrnehmen.

Hirnzellen erweitern ihre Kompetenz

Aus all dem entwarfen wir 1997 ein Modell, das unsere Versuchsergebnisse erklären sollte. Wir vermuteten, dass funktionstüchtige Zellen der Sehrinde, die an den Rändern oder inmitten zerstörter, blinder Bereiche liegen, durch die intensive Stimulation ihr Einzugsgebiet erweitern, das heißt ihr rezeptives Feld etwas ausdehnen. Sie können das unter anderem wohl deswegen, weil von den Zellen ihrer Umgebung keine unterdrückenden Signale mehr kommen. Normalerweise hemmen die Nervenzellen ihre Nachbarn, sodass nur die jeweils am stärksten aktivierte zum Zuge kommt. Solche Nachbarzellen fehlen nun aber. Indem wir die wenigen restlichen Zellen durch unser Training mit Lichtpunkten anregen, stärken wir sie, das heißt ihre Verknüpfungen mit anderen Nervenzellen. Insbesondere scheint das auch den Informationsfluss zu höheren Verarbeitungszentren zu betreffen. So können wenige überlebende Neuronen schließlich genug Kraft bekommen, um visuelle Informationen ins Bewusstsein zu heben. Bezeichnenderweise dauert diese Umorganisation Monate.

Dass winzige Reststrukturen im an sich blinden Gebiet der Sehrinde oder an dessen Rand existieren, konnten wir bei zwei Dritteln unserer Versuchsteilnehmer nachweisen. Dies entspricht auch der Erfolgsquote bei dem Sehtraining. Wir vermuteten, dass bei diesen Patienten solche übrig gebliebenen Zellen der Sehrinde aktiv wurden und ihre Funktionen ausweiteten. Nach diesem Modell schult das Sehtraining mit unserem computerisierten Verfahren Restzellen in der weitgehend zerstörten Sehrinde. Eine Überraschung erlebten wir allerdings, als unser Mitarbeiter Stefan Wüst eine dritte Studie durchführte. Wieder mussten Patienten in der beschriebenen Weise trainieren. Viele von ihnen waren aber, anders als die früheren Teilnehmer, nur auf einem Auge teilblind, da sie an einem Defekt des Sehnervs litten. Genau genommen musste der Schaden sogar vor der Kreuzung beider Sehnerven liegen – denn bei einem Defekt der hinteren Hälfte des Sehnervs wären beide Augen betroffen gewesen (siehe Bild Seite 61).

Eigentlich erwarteten wir bei diesen Teilnehmern kaum einen Übungsgewinn: Wenn bedingt durch einen geschädigten Sehnerv zu wenig Information in die Sehrinde gelangt, lässt sich die Informationsmenge nicht steigern, so nahmen wir an. Doch zu unserem Erstaunen verbesserte sich das Sehvermögen bei den Trainierten der dritten Gruppe sogar noch mehr als bei denen der zweiten Studie. Sie steigerten ihre Sehleistungen um durchschnittlich fast 22 Prozent. Ihr Gesichtsfeld für das behinderte Auge vergrößerte sich im Mittel um 5,8 Grad. Auch bei den Kontrollteilnehmern, die nur fixierende Blickfeldübungen absolviert hatten, verzeichneten wir diesmal einen deutlichen Zugewinn. Deren Gesichtsfeld des behinderten Auges wuchs um 4,3 Grad und das Sehvermögen um sechs Prozent. Außerdem besserte sich bei den meisten Teilnehmern die Nahsicht.



Messung von einem Patienten, der sein linkes Gesichtsfeld eingebüßt hatte (a). Acht Monate Training halfen ihm erheblich (b). Zwei Jahre später war der Zustand ohne Therapie unverändert (c), besserte sich durch neues Üben aber weiter (d) (schwarz: kompletter Ausfall; Grauwerte: manchmal Reaktion).

Überraschender Zugewinn auch bei Sehnerv-Defekt

Offenbar war unser erstes Modell nicht umfassend genug. Den Gesichtsfeldgewinn der Kontrollpatienten und den auffallend hohen Zugewinn der trainierten Teilnehmer erklären wir dadurch, dass diese Gruppe gewöhnlich das schlechte Auge wenig beansprucht und vor allem dessen schwachen Bereich an der Grenzzone zum blinden Feld kaum noch benutzt, da das gute Auge den Defekt ja kompensiert. Als das schlechte Auge aber zum Sehen im Grenzfeld gezwungen wurde, weil das gute abgedeckt war, verbesserte sich die Leistung drastisch.

Zusätzlich erwies die Studie aber, dass die Sehtüchtigkeit auch bei defektem Sehnerv steigerbar ist. Offenbar erhöhte das Training auch hier die Leistung von ▷

▷ Restneuronen, bis sich ein zuverlässigerer Sinneseindruck ergab. Gar keine Verbesserung zeigte nämlich ein Patient, der – neben einer Halbseitenblindheit auf dem einen Auge – auf dem anderen Auge völlig blind war. Dieser Mann versuchte sicherlich im Alltag schon selbst, den verbliebenen Sehrest voll auszunutzen. Das Training konnte ihm darum keinen Zugewinn mehr bringen. Dagegen scheinen viele Patienten im Alltag dazu zu neigen, nur mit dem intakten Bereich zu sehen und den geringen Seheindruck aus den Übergangsbereichen zu vernachlässigen. Wir vermuten, dass das Training dem entgegenwirkt, weil im ansonsten dunklen Raum nur die teilgeschädigten Areale trainiert werden.

Dauerhaft verbesserte Lebensqualität

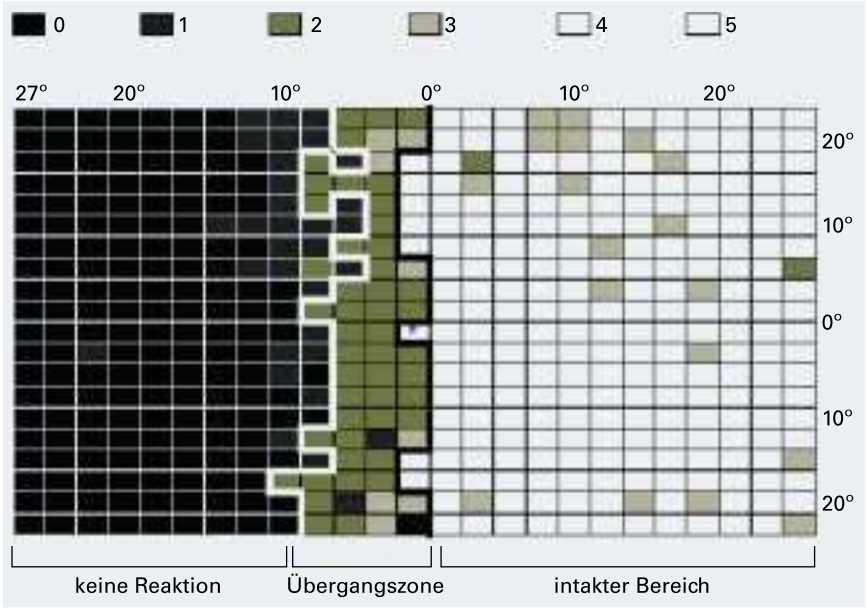
Eine Vergrößerung des zentralen Gesichtsfelds um rund fünf Winkelgrade mag nicht sehr viel erscheinen. Doch immerhin berührt dies meist den Bereich des scharfen Sehens. Von den Patienten unserer Trainingsgruppen mit beidseitiger Teilblindheit spürten 72 Prozent selbst eine Verbesserung ihres Sehvermögens. Sie registrierten, dass sie wieder Objekte vor den Augen wahrzunehmen vermochten, die ihnen vorher entgangen wären. Von den scheintrainierten Personen meinten dagegen nur 17 Prozent, besser sehen zu können als vorher.

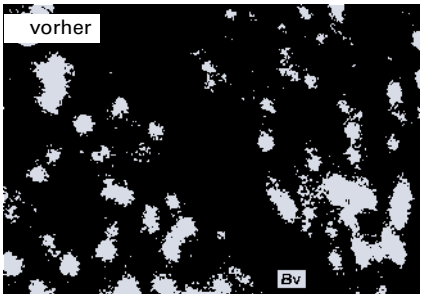
Inzwischen wurden in dem unserem Institut angegliederten »Novavision Zentrum für Sehtherapie« schon 300 weitere teilblinde Patienten mit dem Sehtraining behandelt. Hiervon hat unsere Mitarbeiterin Iris Müller gerade die Daten von 82 Patienten analysiert, die das Training inzwischen abgeschlossen haben. Diese Personen machten ähnlich Angaben wie unsere Studienteilnehmer. Nur 16 Prozent von ihnen spürten subjektiv keine Verbesserung und keinen Gewinn im Alltag. Alle anderen empfanden mindestens in einem Lebensbereich Erleichterung. Rund siebzig Prozent vertrauten ihrem Sehvermögen wieder mehr. 43 Prozent hatten das Gefühl, wieder besser lesen zu können. Ein Teil berichtete auch, seltener mit Menschen oder Gegenständen zusammenzustoßen, beim Sport leichter zurechtzukommen oder weniger Schwierigkeiten mit anderen Hobbys, etwa Handarbeiten, zu haben.

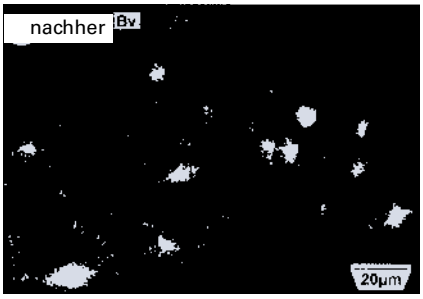
Angesichts dieser Therapieerfolge drängte sich die Frage auf, wie lange die Verbesserung anhält. Würden die Betroffenen lebenslang regelmäßig, vielleicht sogar täglich weitertrainieren müssen, um den geringen Gewinn wenigstens zu erhalten? Glücklicherweise erscheint das bei den meisten Patienten nicht erforderlich. Wir untersuchten das Sehvermögen von 31 Studienteilnehmern erneut zwischen einem halben bis zu zwei Jahren nach Abschluss der sechsmonatigen Übungsphase. Im Mittel hatten sich die Leistungen in der Zwischenzeit um 0,8 Prozent verschlechtert, ein recht geringfügiger Wert. Doch als wir die Daten aufschlüsselten, ergab sich, dass nur ein Teil der Trainierten vom Zugewinn wieder etwas verloren hatte. Ein anderer Teil wies sogar eine weitere Verbesserung auf.

Wir vermuten, dass der Gewinn nur dann bestehen bleibt, wenn die Betroffenen diesen Bereich des Gesichtsfelds tagtäglich im Alltag benutzen. Offenbar gelingt das nicht jedem. Auch diese Beobachtung spricht dafür, dass das Gesichtsfeldtraining einen regelrechten Lernprozess der Nervenzellen der Sehrinde in Gang setzt. Das Gelernte muss aber anscheinend, wie beim Fremdsprachenlernen, regelmäßig angewandt werden. Sonst verblasst es wieder.

Erfreulicherweise stellte sich auch heraus, dass das von uns in Magdeburg entwickelte Gesichtsfeldtraining nicht nur die Wahrnehmung weißer Lichtpunkte schult, wie sie auf dem Monitor erscheinen. An sich sind in der Hirnrinde für das Erkennen von Hell und Dunkel andere Zellen oder Zellgruppen zuständig als etwa für Farben. Trotzdem sehen viele der Patienten im hinzugewonnenen Bereich auch wieder Farben und Konturen – was sie vorher gleichfalls nicht konnten. Dieser Effekt ist zwar etwas geringer als bei den Helligkeitswerten. Doch er enthebt die Betroffenen der Mühsal, diese gerade im Alltag entschei-

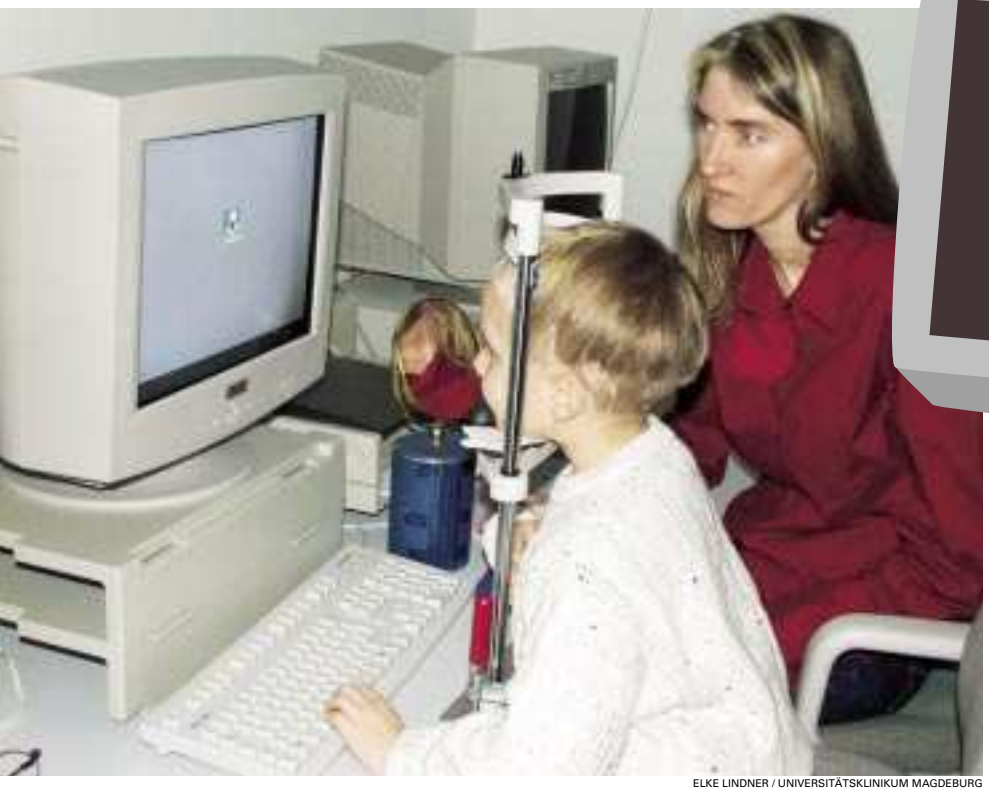




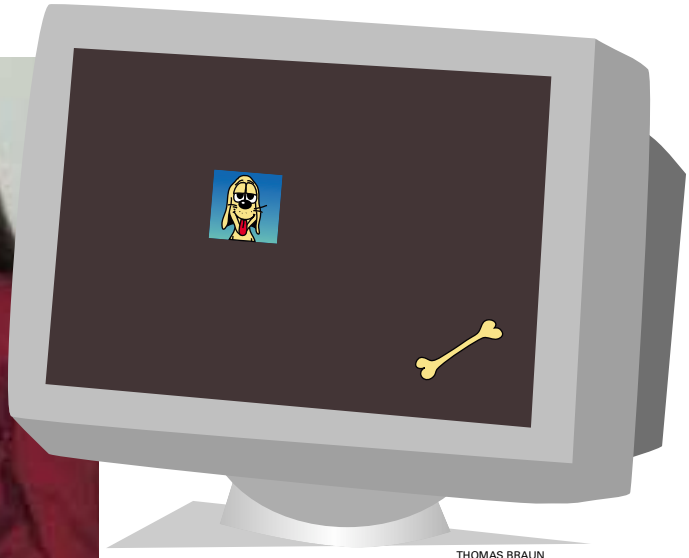


BEIDE BILDER: INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE PSYCHOLOGIE, UNIVERSITÄT MAGDEBURG

Das Trainingsprogramm nutzt aus, dass bei vielen Teilblinden ein Übergangsbereich der Hirnrinde manchmal noch bei Lichtreizen anspricht (oben: Reaktionszahl bei fünf Reizen an der Stelle). Im Tierversuch überlebten nach einer Läsion des Sehnervs einzelne Zellen der Netzhaut (unten).



ELKE LINDNER / UNIVERSITÄTSKLINIKUM MAGDEBURG



THOMAS BRAUN

Unsere Mitarbeiterin Iris Müller arbeitet in einem Forschungsprojekt mit hirngeschädigten Kindern. Um die kleinen Patienten für das Gesichtsfeldtraining zu motivieren, entstand ein Programm mit animierten Witzbildern. Dieses Programm findet selbstständig den Übergangsbereich, den es dann trainiert.

denden Fähigkeiten gesondert üben zu müssen. Allerdings erkannten nur solche Personen auch wieder Formen und Farben im gewonnenen Sehbereich, bei denen die Schädigung hinter der Sehnervenkreuzung lag. Bisher können wir die Diskrepanz nicht erklären.

Plötzlich doch nicht blind

Aber nicht jede Veränderung der Sehleistung muss damit zusammenhängen, dass die Zellen langsam etwas Neues lernen. Denn auch die momentane Aufmerksamkeit kann das Verhalten der Zellen beeinflussen. Dieser Effekt setzt dann aber sofort ein – nicht nach Monaten wie bei unseren Studien –, und er bleibt nicht bestehen. Wie Tierversuche erwiesen, verändern die Zellen der Sehrinde ihren Einzugsbereich fortwährend, abhängig von der Stimmung und dem Befinden des Tiers. Bei Schläfrigkeit wird er vorübergehend größer, bei Wachheit und Aufmerksamkeit kleiner.

Vielleicht erklärt sich so, dass Teilblinde manchmal plötzlich im blinden Feld ohne Training doch Lichtreize bewusst wahrnehmen können. Dieses Phänomen prüfte unsere Mitarbeiterin Dorothe Poggel vor zwei Jahren. Sie sagte den Versuchspersonen jeweils, auf welchen Bereich des Bildschirms sie beim Sehtest besonders achten sollten, während sie starr zum Fixationpunkt in der Mitte des Schirms blicken mussten. In manchen Durchgängen zeigte ein quadratischer Rahmen auch vorher an, wo der Lichtreiz auftreten würde. Zu ihrer eigenen großen Verblüffung erkannten die Patienten im blinden Bereich im vorher ausgewiesenen Rahmen nun viel mehr Lichtpunkte als ohne die Anweisung.

Auch die Motivation beeinflusst erstaunlicherweise das Lernen der Nervenzellen. Schon Manfred Fahle hatte bei den Übungen zur Sehschärfe beobachtet, dass die Teilnehmer das Verlangte schneller lernen, wenn man ihnen stets mitteilt, dass sie den Reiz richtig erkannt haben. Diesen Aspekt berücksichtigen wir inzwischen in einem an unserem Institut speziell für Kinder entwickelten Trainingsprogramm. Auf dem Bildschirm erscheint statt eines langweiligen Fixationspunkts eine animierte Trickfilmfigur, und statt mit einfachen Lichtpunkten wird das visuelle System mit Bildern von Objekten gereizt (siehe Bild oben). Außerdem erscheinen bei Leistungsfortschritten nach jedem Durchgang auf dem Bildschirm immer mehr Teile eines großen Puzzlebilds.

Jedes Gehirn ist individuell gestaltet, und seine Struktur hängt auch vom Gebrauch ab. Selbst das visuelle System, so präzise es eigentlich verschaltet zu sein scheint, erweist sich als unerwartet plastisch und bis ins Alter lern- und anpassungsfähig. Offenbar sind plötzlich funktionslos gewordene Gehirnzellen stets bereit, wieder Aufgaben zu übernehmen. Diese Eigenschaft versuchen Neurowissenschaftler zum Nutzen von Patienten zu verwerten und so auch Erkrankungen zu behandeln, die bisher als unabänderlich galten. ◁

Erich Kasten (oben) ist Klinischer Neuropsychologe am Institut für Medizinische Psychologie der Universität Magdeburg. Für »Spektrum der Wissenschaft« verfasste er den Artikel »Wenn das Gehirn aus der Balance gerät: Halluzinationen« (Dezember 2000, S. 64). **Bernhard A. Sabel** ist seit 1992 Direktor des Instituts für medizinische Psychologie der Universität Magdeburg.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Diagnose und Behandlung zerebraler Störungen. Von Erich Kasten. Shaker-Verlag, Aachen 1999.

Computer-based Training for the Treatment of Partial Blindness. Von Erich Kasten et al. in: Nature Medicine, Bd. 4, Heft 9, Sept. 1998, S. 1083.

Restoration of Vision by Training of Residual Functions. Von Bernhard A. Sabel und Erich Kasten in: Current Opinion in Ophthalmology, Bd. 11, 2000, S. 430.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Milchstraße ist ein Spiralnebel

Die drahtlose Welle hat den endgültigen Beweis erbracht: Auch unsere Milchstraße ist ein Spiralnebelsystem, gleich dem der anderen Millionen draußen im Universum. Eine völlig neue Wissenschaft, die Radioastronomie, ist in stürmischem Ausbau begriffen, damit keine der Stimmen, die aus unbekannten Fernen auf uns eindringen, fürderhin ungehört verhallt. … Längs zweier langgestreckter Kurven, deren eine durch den Ort der Sonne in der Milchstraßenebene geht, … fällt die atomare Dichte auf etwa die Hälfte ab. Es liegt nahe, die Gebiete größerer Dichte als Spiralarme des Milchstraßensystems zu deuten. *(Funkschau, 25. Jg., 2. Heft 18, 1953, S. 350)*

Elektrisches Pianophon

Neben Klavier und Orgel ist jetzt als neues Tasteninstrument das Pianophon entwickelt worden, ein elektrisches Musikinstrument, das in Form eines tragbaren flachen Koffers gebaut ist. … Sobald der Deckel aufgeklappt wird, liegt vor dem Musikausübenden eine Originalklaviertastatur mit den entsprechenden Möglichkeiten. Dennoch ist das Pianophon kein Klavier, da es – je nach der Art des Aufschlages – verschiedenartige Toneffekte zuläßt. ... Das Pianophon wird als elektrisches Musikinstrument vielleicht auch bisher unbekannte Gebiete der Klanggestaltung erschließen. *(Orion, 8. Jg. Nr. 17/18, 1953, S. 756)*

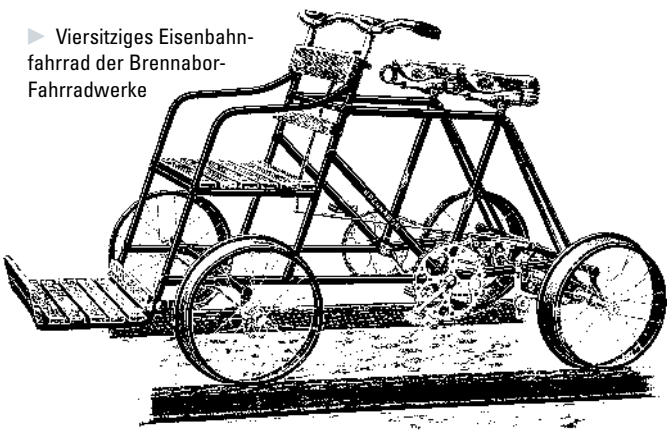
Ein Mensch aus tausend Teilen

Nach eingehender Entwicklungsarbeit hat die Histoslide Comp. Inc. in Chicago zerlegbare Lehrmodelle des menschlichen Körpers und seiner Organe herausgebracht, deren Einzelteile aus PVC-Pasten so hergestellt sind, daß sie in ihrer Berührung lebensnah wirken. … Das Gesamtmodell enthält über 1000 Gefügeteile, von denen 604 wichtigere Teile durch Zahlen bezeichnet und in einem beigegebenen Buch erklärt sind. Das Einheitsmodell ist mit auswechselbaren männlichen und weiblichen Organen versehen. Zur Herstellung werden nach Gipsabgüssen gefertigte zweiteilige Aluminiumformen verwendet. Diese werden zunächst auf 110° C vorgewärmt, bei niedrigem Druck mit der Paste gefüllt und bei 200° C geliert. Anschließend wird von Hand bemalt. *(Kunststoffe, Bd. 43, Heft 9, 1953, S. 354)*

▶ Der menschliche Körper wurde zu Lehrzwecken in Lebensgröße als Modell nachgebaut.

Ein Fahrrad für den Bahnmeister

Eine besondere Gattung von Fahrrädern ist das Eisenbahnfahrrad, welches vorzugsweise von Bahnmeistern und Oberbeamten zur Besichtigung der Bahnstrecke Verwendung findet. Solche von den Brennabor-Fahrradwerken gebauten Fahrzeuge bieten Platz für 1–4 Personen. Diese Räder sind ähnlich den modernen Strassen-Vierrädern gebaut, nur mit dem Unterschied, dass die Lenkstangen fest sitzen, und die … Räder einen dem Eisenbahnwagenrad ähnlichen Querschnitt besitzen. Einen Viersitzer zeigt die Abbildung. Derselbe wird jedoch nur von zwei Personen fortbewegt, der Vordersitz ist für zwei Oberbeamte vorgesehen. *(Dinglers Polytechnisches Journal, 84. Jg., Bd. 318, Heft 37, 1903, S. 590)*



▶ Viersitziges Eisenbahnfahrrad der Brennabor-Fahrradwerke

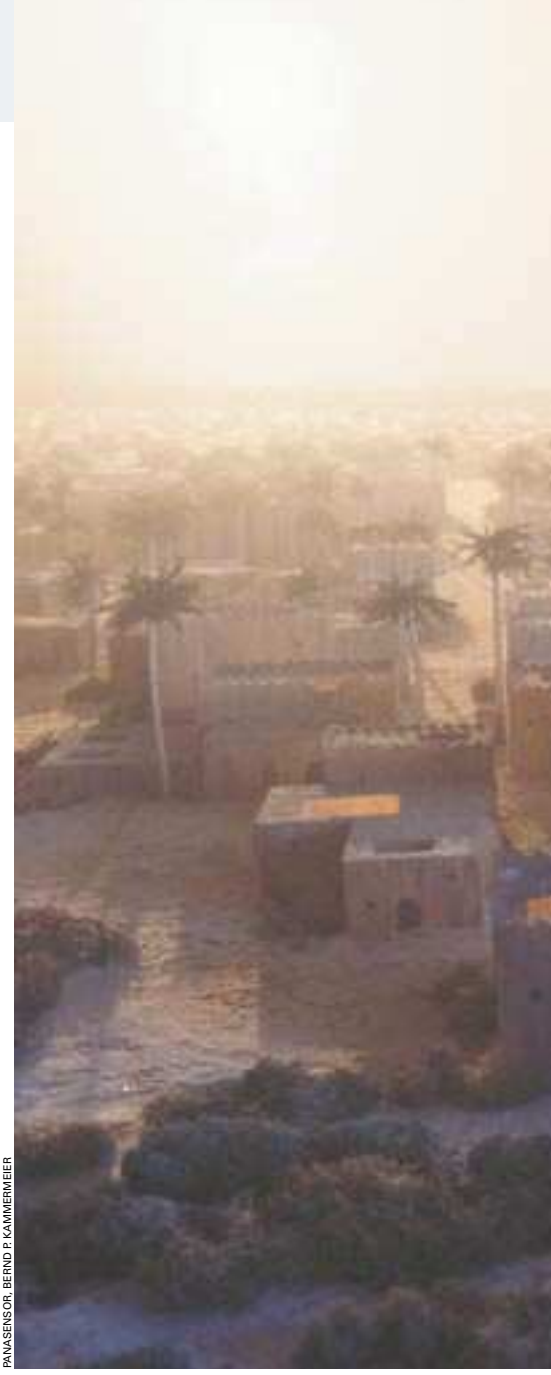
Schnee auf dem Mond

Der hervorragende amerikanische Astronom Pickering … behauptet das Vorhandensein von Schnee auf dem Monde. Viele Krater sind nämlich mit einer weißen Masse bedeckt, welche im Sonnenlicht brillant leuchtet, und man findet diese oder eine ähnliche Masse auch auf den großen Ringwällen und den Gipfeln der hohen Gebirge. Diese weißen Flecke verändern ihren Anblick mit dem Beleuchtungswinkel und legen den Gedanken nahe, daß sie aus mehr oder minder regelmäßig verteilten Eismassen bestehen. *(Der Stein der Weisen, Bd. 29, 1903)*

Bunsenbrenner aus Porzellan

Eines der meistgebrauchten Geräte des Chemikers, der Bunsenbrenner, bisher aus Messingrohr mit gusseisernem Fuss gefertigt, hat die Königl. Sächsische Porzellanmanufaktur in Meissen einer Umänderung unterzogen, indem sie ihn aus Porzellan herstellt. Als Vorteil der Porzellanbrenner wird genannt: … besondere Brauchbarkeit bei Veraschungen, Flammreaktionen, sowie beim Abdampfen saurer Flüssigkeiten im Abzuge, wobei alle Metallbrenner mehr oder minder leiden. Die Gefahr des Springens des Brennerkopfes ist dabei eine sehr geringe; ausserdem kann das Brennerröhrchen eintretenden Falles sehr leicht und ohne erhebliche Kosten wieder ersetzt werden. *(Elektrochemische Zeitschrift, 10. Jg., Heft 6, 1903, S. 148)*

Tod in Mesopotamien



PANASENSOR, BERND P. KAMMERMEIER

Leben und Tod waren in der Glaubenswelt der ersten Zivilisationen an Euphrat und Tigris untrennbar miteinander verbunden. Wer seine Ahnen nicht ehrte, dem drohte Ungemach.

Von Angelika Berlejung
und Joachim Bretschneider

Tod im Frühstücksfernsehen! Der Krieg im Irak kam diesmal als Livebericht auf die Mattscheiben in aller Welt. Doch erst nach dem Sieg der Alliierten über das Saddam-Regime, erst als organisierte Banden und wütender Pöbel die Museen des Landes plünderten, erfuhren viele Menschen, dass dieser Krieg auf antikem Boden stattfand.

Denn der heutige Irak war einst das Kernland des Zweistromlands, Wiege und Heimat der ersten Zivilisationen. In den fruchtbaren Schwemmgebieten zwischen Euphrat und Tigris entstand im 4. Jahrtausend v. Chr. Uruk, die erste Großstadt der Menschheit. Es sollte noch Jahrhunderte dauern, bis auch in Ägypten Vergleichbares aufkam. Den Völkern Mesopotamiens – wie Sumerer, Babylonier und Assyrer – gelangen wegweisende Erfindungen wie das Rad und die Schrift. Sie schufen die ersten Gesetzeswerke, begründeten Mathematik und Astronomie, perfektionierten die Ton-, Metall- und Steinverarbeitung und erfanden das Bier. Doch auch biblische Motive gehen auf babylonische Wurzeln zurück: Der Paradiesgarten, die Sintflutgeschichte, der Turmbau und die Sprachverwirrung von Babel sind ohne Mesopotamien nicht zu denken. Als der babylonische König Nebukadnezar II. (605 – 562 v. Chr.) die Judäer ins »babylonische Exil« führte und die Mauern von Jerusalem zerstörte, hat er auch die Geschichte Palästinas nachhaltig geprägt.

Kein einziges Museum weltweit konnte es mit der Sammlung mesopotamischer Kunstschätze in Bagdad aufnehmen. Unter den verschwundenen oder zerstörten Kunstgegenständen wie unter den vernichteten Keilschrifttexten legten viele auch Zeugnis davon ab, wie Menschen jener frühen Zivilisationen mit dem Tod umgingen.

Dieser war im Nahen Osten vorchristlicher Zeiten ein vertrauter Begleiter und akzeptierter Bestandteil des Lebens. Niemand glaubte daran, dass er ihm entkommen könne, denn die Götter hatten dem Menschen den Tod von Anfang an mitgegeben. Eine Lebenserwartung von etwa 35 Jahren bei Frauen,

Die Metropole Babylon, südlich des heutigen Bagdad gelegen, dominierte lange Zeit in Mesopotamien (hier eine Rekonstruktion des »Turmes von Babel«). Doch trotz aller Pracht: Seine Bewohner erwarteten ein düsteres Jenseits, das nur durch Rituale und Opfergaben der Lebenden erträglich wurde.

45 Jahren bei Männern und eine enorm hohe Kindersterblichkeit ließen keinerlei Zweifel daran aufkommen. Zwar berichtet das akkadische Gilgamesch-Epos, eines der ältesten Literaturwerke der Welt, von der Suche des legendären Königs von Uruk nach dem »Kraut des Lebens«. Doch eine Schankwirtin erklärte ihm im Epos: »Gilgamesch, wohin läufst du? Das Leben, das du suchst, wirst du nicht finden! Als die Götter die Menschheit erschufen, wiesen sie der Menschheit den Tod zu, nahmen das Leben in ihre eigene Hand. Du, Gilgamesch, voll sei dein Bauch, Tag und Nacht tanze und spiele! … Sieh auf das Kind, das deine Hand gefasst hält. Die Gattin freue sich auf deinem Schoß! So ist das Tun der Menschen!« (TUAT III.4, 665f, Gilgamesch-Epos, Meissner-Millard Tafel Kol. iii 1 12)

War das Sterben offenbar unausweichlich, waren drei Aspekte von Bedeutung: unter welchen Umständen ein Mensch verschied, wie er bestattet wurde, und in welcher Form man seiner gedachte.

Als Ideal galt der normale, »gute« Tod in hohem Alter. Ihn fühlte man herannahen und er brachte ein erfülltes und ehrenwertes Leben zu einem würdigen Abschluss. Ein vorzeitiges, gar plötzliches Ableben auf Grund von Krankheit, Unfall, Mord oder gar durch Hinrichtung galten hingegen als Schande. Denn die Menschen jener Zeit glaubten, dass dem Charakter und der Lebensführung einer Person im Idealfall seine Todesart entsprechen würde. Allerdings diskutierten philosophische Texte wie der aus Babylonien stammende »Ludlul bel nemeqi« durchaus die mangelnde Verlässlichkeit jener Weltordnung. Denn mitunter traf der plötzliche, »schlechte« Tod durchaus einen gottesfürchtigen und vorbildlichen Menschen, während ein Gottloser im hohen Alter friedlich entschlafen durfte. Eine Vorstellung von einem Paradies, in ▷

AKG BERLIN

Den Rang eines Toten spiegeln kostbare Grabbeigaben wie diese Harfe aus einem der Königsgräber in Ur wider. Der goldene Stierkopf wurde bei den Plünderungen in Bagdad beschädigt.

▷ dem nach dem Tod ein gerechter Ausgleich für alle Taten durch Belohnung oder Strafe erteilt wurde, gab es nicht. Die Götter der Unterwelt Mesopotamiens unterschieden weder zwischen Gut und Böse noch hielten sie Gericht über die Toten.

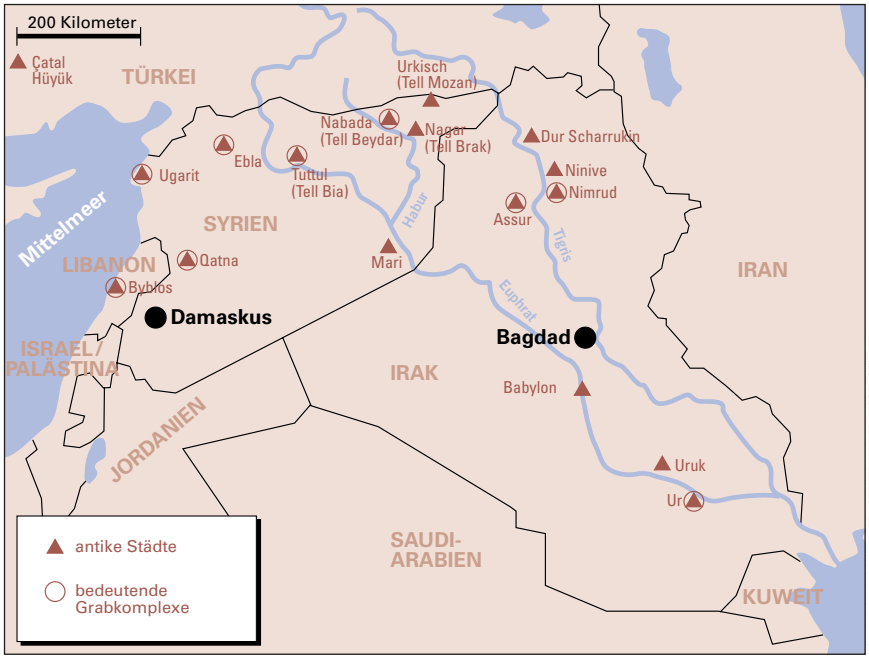
Gesalbt, geschminkt, begraben

Wie in vielen anderen Religionen galt ein Teil des Menschen als unsterblich. Doch war dieser Totengeist zunächst noch an den Körper gebunden. Die Schlüsselrolle für die Trennung beider kam dem korrekt durchgeführten Begräbnis zu. Es überführte den ungreifbaren, aber durchaus sicht- und hörbaren Geist in einem Übergangsritual vom Diesseits in das Jenseits.

Mit dem Leichnam selbst wurde je nach Epoche, Gegend und Sozialstatus unterschiedlich verfahren: Nur sehr selten verbrannten die Angehörigen ihre Verstorbenen. Auch warf man sie nicht wilden Tieren vor, um nur die abgenagten Gebeine zu bestatten (eine solche »Entfleischung« bezeugen beispielsweise 8000 Jahre alte Wandmalereien in der anatolischen Siedlung Çatal-Hüyük). Nach Quellen aus dem 1. Jahrtausend v. Chr. wurde ein Leichnam zunächst gesalbt, geschminkt, bekleidet und geschmückt, bevor er am dritten Tag nach Todeseintritt bei Sonnenuntergang beigesetzt wurde. Meist bettete man den vollständigen Körper in leichter Hockstellung zur letzten Ruhe. Vielleicht steckt hinter dieser Positionierung die Vorstellung, dass der Mensch beim Tod in den Schoß von Mutter Erde zurückkehren würde, war er doch dem Mythos nach aus Lehm entstanden und wurde wieder zu Erde. So klagt Gilgamesch über seinen toten Freund Enkidu: »Mein Freund, den ich so sehr liebte, wurde zu Lehm.« (TUAT III3.4, S. 721, Gilgamesch Tafel X col. ii)

Mitglieder der Eliten setzte man in Sarkophagen bei, ansonsten waren große Vorratsgefäße oder einfache Gruben üblich. Bestattet wurde unter den Fußböden von Häusern und Palästen sowie in Nekropolen und Felsgräbern außerhalb der Städte. Frei stehende, weithin sichtbare Mausoleen für die Könige etwa analog der ägyptischen Pyramiden waren in Mesopotamien eher unüblich. Je nach Aufwand musste den Bau der »Unterkunft« schon zu Lebzeiten in Auftrag gegeben werden.

Die Angehörigen legten ihren Toten Nahrung als Reiseproviant für den Weg in die Unterwelt bei, zuweilen auch Geschenke für die dort wohnenden Götter, um sie gnädig zu stimmen. Die Ausstattung der Gräber mit Nützlichem und Kostbarem brachte die Unterschiede in den Gesellschaftsschichten besonders deutlich zum Ausdruck. Generell gilt: Je reicher jemand im Leben war, desto mehr Beigaben begleiteten ihn im Tod.



JOACHIM BRETSCHNEIDER / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Vor mehr als 5000 Jahren entstand das Reich der Sumer mit dem Zentrum Uruk. Es folgten Hurriter und Mittani, Babylonier und Assyrer. Mit der Einnahme Babylons durch die Perser 539 v. Chr. endete Mesopotamiens Macht.

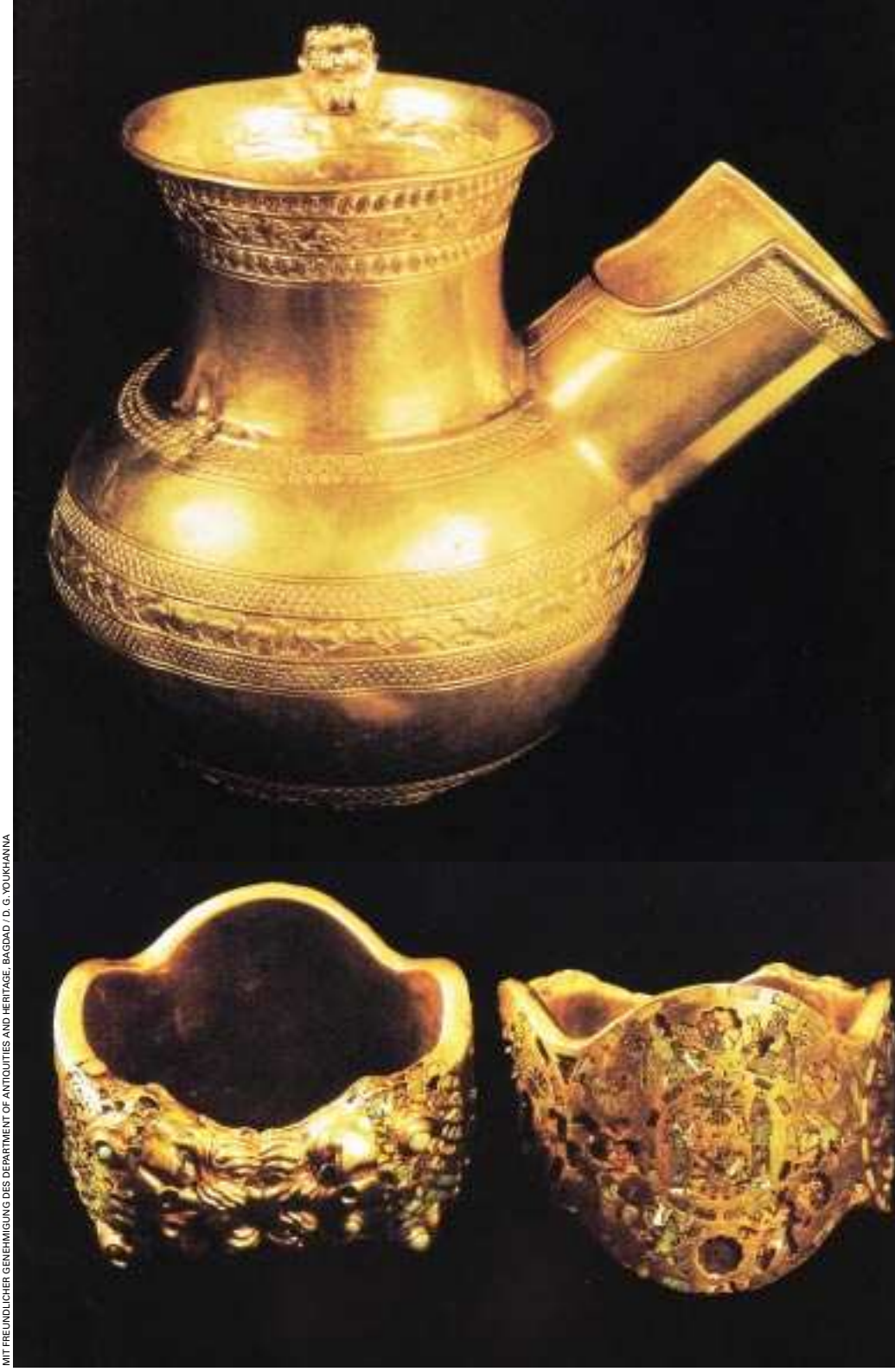
Bereits in die Mitte des 3. vorchristlichen Jahrtausends datiert zum Beispiel ein Herrschergrab im nordmesopotamischen (heute syrischen) Tell Beydar, dem antiken Nabada (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 42). Einer von uns (Bretschneider) entdeckte es vor zwei Jahren gemeinsam mit syrischen Kollegen im ehemaligen Palastbezirk.

Waffen und eine Vielzahl von Bronze- und Keramikgefäßen waren dem Toten in der dreiräumigen Gruft für die Reise ins Jenseits mitgegeben worden. Steinkreise mit einem Dolch und weitere mit Tierknochen sowie eine Statuette aus Ton sind frühe Zeugnisse eines Begräbnisrituals. Offen bleibt die Interpretation der Statuette: Welche Rolle kam ihr zu? Deuten die Steinkreise mit dem Dolch darauf hin, dass der Beigesetzte ein bedeutender Krieger gewesen war? Die Untersuchung der Funde dauert noch an. Opferschalen und rauchgeschwärzte Kultständer in der Hauptkammer bezeugen ebenfalls zeremonielle Handlungen im Rahmen der Beisetzung; danach hatte man den Zugang verschüttet.

Ein Hofstaat für den Totengeist

Wahrhaft königliche Schätze entdeckten die Tübinger Archäologen Peter Pfälzner und Mirco Novák in einer tausend Jahre jüngeren Gruftanlage unter dem Palast von Qatna (Syrien) im Winter des letzten Jahres (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 10). In vier unterirdischen Felskammern, über einen langen Korridor vom Palast aus zugänglich, lagen die sterblichen Überreste des Herrscherhauses. Goldene Schmuck- und Zierelemente und andere Preziosen füllten neben einer großen Zahl von Vorrats- und Speisegefäßen die Grabräume. Der ungestörte Grabfund belegte zeitlich gestaffelte Bestattungsrituale sowie kultische »Mahlzeiten« zwischen Verstorbenen und Lebenden in der Gruft. Offensichtlich besuchte man die toten Vorfahren regelmäßig und hielt dadurch die Verbindung zu ihnen aufrecht.

Nicht nur Schätze sondern auch Teile des Hofstaates folgten den Herrschern von Ur im Süden Mesopotamiens vor über 4500 Jahren ins Jenseits. Nahe der heutigen – während des jüngsten Krieges heftig umkämpften – Stadt Nasirije entdeckte der englische Archäologe Sir Leonard Woolley (1880–1960), vom Britischen Museum in London in den 1920er und 1930er Jahren Gräber der Könige des 3. vorchristlichen Jahrtausends. Gefolgsleute, Dienerinnen, Musikanten mit ihren Instrumenten, Soldaten mit Waffen, selbst Wagen mit Gespannen gehörten zur Grabausstattung. Mensch und Tier starben wahrscheinlich an Gift und wurden anschließend in Reih und Glied in den Grabschächten niedergelegt. Derartige Gefolgschaftsbestattungen blieben aber im mesopotamischen Raum auf das Reich von Ur beschränkt. ▷



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DES DEPARTMENT OF ANTIQUITIES AND HERITAGE, BAGDAD / D. G. YOUKHANNA

Goldkanne und Armreifen sind Beispiele der fein gearbeiteten Beigaben aus den Königinnengräbern der neuassyrischen Hauptstadt Nimrud. Die reich ausgestatteten Grüfte waren kurz vor dem ersten Golfkrieg (1991) von irakischen Wissenschaftlern entdeckt worden. In einem Safe der Zentralbank von Bagdad hatte der Goldschatz die jüngsten Kampfhandlungen überstanden.

HIRMER FOTOARCHIV, MÜNCHEN

Der goldene Zeremonialhelm des Königs Meskalamdug (um 2600 v. Chr.) ebenso wie der Dolch mit Lapislazuligriff und goldener Scheide stammten aus dem Königsfriedhof von Ur.

▷ Die Wirren des ersten Golfkriegs im Jahr 1991 überschatteten einen der größten Funde unseres Jahrhunderts: Die irakischen Archäologen Muayad Damerji und Muzahim Hussein fanden bei Restaurierungsmaßnahmen in Nimrud (assyrisch Kalhu, dem biblischen Kalah, heute südlich von Mossul), einst Hauptstadt des neuassyrischen Reichs, die unversehrten Gräber verschiedener Königinnen aus dem 9. – 8. Jahrhundert v. Chr. Unebenheiten in der Fußbodenpflasterung des lange bekannten Palastes von Assurnasirpal II (883–859) brachten Forscher auf die Spur – seit 1845 waren englische Archäologen buchstäblich über diese Schätzen hinweg gegangen. Nach altem Brauch hatte man die Toten in gemauerten Grüften unter den Fußböden des Königshauses bestattet.

Die Fülle und Qualität der Beigaben übertraf alles bisher Bekannte: Mehr als einen Zentner wogen allein die goldenen Schmuckstücke. Einzigartig war auch eine in Marmor gearbeitete Steintafel aus der Gruft der Königin Jaba, Frau des Assyrerkönigs Tiglatpilesar III. (744–727 v. Chr.). Eine lange Fluchformel in Keilschrift warnte jeden davor, sich an den Schätzen des Grabes zu vergreifen: »Wer ... nach meinem Schmuck in böser Absicht seine Hand ausstreckt, wer das Siegel des besagten Grabes öffnet: Oben, im Sonnenschein, soll sein Totengeist durstig durch die Außenbezirke laufen! Unten, in der Unterwelt, soll er beim Wasserspenden erstklassiges Bier, Wein (und) ... Mehl ... nicht erhalten! ... die großen Götter der Unterwelt, mögen (seinem) Leichnam (als) Geist Ruhelosigkeit auferlegen für alle Ewigkeit!« (Übersetzung von Behzad Mofidi Nasrabadi.)

Das Land ohne Wiederkehr

Solche Flüche waren ebenso üblich wie Amulette und magische Zeichen. Denn der Leichnam und sein Grab galten als gefährdet: Offenbar wurde die Leiche immer noch als ein Mensch angesehen, jedoch in seiner schwächsten und angreifbarsten Form. Er konnte nicht mehr selbst dafür Sorge tragen, dass der Verwesungsprozess im Grab und die Reise in die Unterwelt ungestört verliefen. So waren die Lebenden bemüht, ihre Angehörigen in dieser prekären Lage so gut wie möglich zu unterstützen. Nach der Beisetzung versiegelten sie das Grab deshalb mitunter regelrecht . Für die Hinterbliebenen begann anschließend der zweite Teil der Trauerzeit. Bei den Assyrern, Babyloniern, aber auch bei den Israeliten (1 Samuel 31:13, Sirach 22:12) und Achämeniden dauerte sie üblicherweise sieben Tage.

Das Jenseits wurde in Mesopotamien, Palästina und Syrien unterhalb der Erde angesiedelt. Die Vorstellungen, die sich damit verbanden, sind äußerst vielfältig und komplex. Die mesopotamischen Bezeichnungen »Land des Seufzens«, »Land ohne Wiederkehr«, »Haus des Staubes«, »Haus der Finsternis« oder »Ort des Sonnenuntergangs« machen deutlich, dass man dort nichts Gutes erwartete. Vielmehr drängten sich die Verstorbenen in der finsteren Totenstadt jammernd in den Ecken und aßen Staub und Lehm. Im Zentrum der Stadt, die durch sieben Tore erreicht wurde, stand der Palast des Götterpaares der Unterwelt Nergal und Ereschkigal, in dem sie mit ihrem Hofstaat residierten.

Das Schattendasein mit Hunger und Durst konnte nach altorientalischer Vorstellung nur dadurch erträglicher werden, dass die Angehörigen ihre Verstorbenen mit Nahrung (meist Mehl, Getreide) und Wasser versorgten. Diese Gaben an die

BEIDE BILDER: JOACHIM BRETSCHNEIDER

Palast und Tempel dominierten das Stadtbild von Nabada im 3. Jahrtausend (siehe Karte Seite 70). Mehrere Meter unter dem Fußboden eines Tempels lag eine Gruft. In ihrer Hauptkammer war ein etwa 1,80 Meter großer Mann mit Waffen (a), Bronzegefäßen (b) und Opfergaben in Tonkrügen (c) beigesetzt worden. Noch unklar ist die Bedeutung eines Steinkreises, in dessen Mitte ein Bronzedolch steckte (d).

Totengeister waren neben einer namentlichen Anrufung wesentlicher Bestandteil der Totenpflege. Diese sollte die Existenz in der Unterwelt erleichtern und die Identität des Verstorbenen absichern. Diesem Zweck dienten auch Gedenksteine, Statuetten oder Statuen.

Wenn auch literarische Quellen immer wieder deutlich machten, wie wichtig die Pflege der Toten sei, so sah die Realität doch anders aus. Archäologische Grabungen bestätigen häufig, dass ältere Gräber beraubt, mehrfach belegt oder gar nicht mehr gepflegt worden sind. Damit setzten sich die Hinterbliebenen allerdings dem Zorn des Toten aus.

Knochen im Reisegepäck

Als gefährlicher Geist suchte der so Betrogene die Lebenden heim und konnte sogar tödliche Krankheiten auslösen. Das geschah auch dann, wenn der Verblichene nicht ordentlich beigesetzt wurde, weil er zum Beispiel fern der Heimat starb, oder wenn Grabräuber seine Ruhe störten. Auf diesem Hintergrund wird verständlich, warum der Assyrerkönig Assurbanipal (669–629 v. Chr.) die Leichen seiner Gegner zerstückelte und »in alle Länder« verschickte, oder die Gebeine feindlicher Könige nach Assyrien verschleppte, wo er sie von deren leiblichen Söhnen öffentlich zermahlen ließ. So hatte er nicht nur die Dynastie des Feindes ausgerottet, sondern sie auch noch zu ruhelosen Totengeistern gemacht und damit der noch lebenden Königsfamilie eine dauerhafte Bedrohung beschert.

Kein Wunder, dass – Inschriften zufolge – die Einwohner verschiedener Städte auf der Flucht vor den nahenden Assyrern auch die Knochen ihrer Toten mitnahmen! Durch eine später wiederholte Bestattung konnte man die Ruhe der Geister zwar wiederherstellen. Wenn es jedoch nichts mehr zu bestatten gab, bestand diese Möglichkeit nicht mehr. Die letzte Rettung konnte dann in exorzistischen Ritualen bestehen, deren Aufgabe es war, ruhelose Geister wieder in die Unterwelt zu bannen.

Wenn die Bestattung jedoch ordnungsgemäß verlief, war der Totengeist mitunter sogar hilfreich. So kannte man im syro-mesopotamischen Raum seit dem 3. Jahrtausend v. Chr. verschiedene Feste, zu denen die Toten für kurze Zeit auf die Oberwelt aufstiegen, um dann bei ihrer Rückkehr in die Unterwelt unter Umständen Krankheiten mitzunehmen. Die Begegnung mit einem Totengeist konnte auch bewusst provoziert werden, indem man ihn herbeirief und über die Zukunft befragte. Anscheinend gab es re- ▷

EBERHARD THIEM, LOTOS-FILM

Auch diese Goldkrone mit geflügelten Genien stammt aus den Königinnengräber in Nimrud. Reichtum und Prachtentfaltung des assyrischen Hofes müssen unermesslich gewesen sein.

▷ gelrechte Berufsgruppen, die sich auf die Totenevokation spezialisiert hatten.

Dass den Toten zwar keine körperlichen Kräfte, jedoch übernatürliche Fähigkeiten zugesprochen wurden, zeigt auch die gelegentliche Vergöttlichung Verstorbener. So wurde mancher Hochrangige in Syrien und Mesopotamien nach dem Tode als Gott bezeichnet; mitunter erhielt der Name eines verstorbenen Königs einen Zusatz, der sonst nur Gottheiten zukam. In solchen Fällen konnte sich die übliche Totenpflege zum Ahnenkult entwickeln.

Vergöttlichung der Herrscher

Eine solche kultische Verehrung der vergöttlichten, beziehungsweise göttlichen Ahnen ist besonders in den Zivilisationen auf dem Boden des heutigen Syrien gut belegt. Sie betraf vor allem verstorbene Könige, die als Vorfahren der herrschenden Dynastien segensreich für den regierenden König wirken sollten. Im Ugarit des 2. Jahrtausends v. Chr. wurden Steinstelen als Repräsentationen der Ahnengottheiten errichtet, an denen man opfern und den Vorvätern begegnen konnte. Es war die Pflicht des ältesten Sohnes einer Familie, diesen Kult zu pflegen, denn schließlich verdankte er seinen Vorfahren seine gegenwärtige Position, die er in dynastischer Linie weiterzuführen hatte.

Aber auch im heutigen Nordirak war die Vergöttlichung der Herrscher nicht unbekannt. Als im Jahr 612 v. Chr. ein Aufstand durch die Straßen der assyrischen Hauptstadt Ninive tobte und das Schicksal dieses Reiches besiegelte, richtete sich der Zorn der Unterdrückten auch gegen eine Bronzeplastik des akkadischen Königs Naramsins (ca. 2250 v. Chr.) im Tempel der Liebesgöttin Ischtar. Der König, der sich selbst »Herrscher der vier Weltteile« genannt hatte, galt vielen wohl als Sinnbild des totalitären Regimes. Ein Schwerthieb hinterließ eine tiefe Kerbe in der Nase des Bronzekopfes, seine Augen wurden ausgekratzt.

Starb ein König in der Ferne und blieb zudem unbestattet, kam es zur nationalen Katastrophe: Als der Assyrerkönig Sargon II. (722–705 v. Chr.) auf einem Feldzug in den kappadokischen Bergen fiel, konnte seine Garde den Leichnam nicht bergen. Das von ihm zuvor eigens als Hauptstadt ausgebaute Dur Scharrukin (Horsabad bei Mossul) wurde verlassen. Sein Sohn und Thronfolger Sanherib bezog in Ninive seine Residenz. Doch lastete auf der Dynastie das Problem, dass der Vorfahre kein ordentliches Grab gefunden hatte: Sanherib und dessen Sohn Asarhaddon konnten sich dieses schändliche Ende nur so erklären, dass die Götter ihren Ahn für eine Verfehlung bestraft hatten. Vater und Sohn gingen damit unterschiedlich um: Sanherib, vermied es, in seinen Inschriften den Namen seines Vaters auch nur zu nennen, um den Makel totzuschweigen. Asarhaddon hingegen wollte den Fluch von seiner Familie lösen, indem er die »Sünde Sargons« erkundete, um sie für die Zukunft zu vermeiden.

Er scheint nicht wirklich erfolgreich gewesen zu sein, wie das wechselvolle Schicksal des Irak zeigt. Nach dem Sturz des Hussein-Regimes fielen wertvolle Zeugnisse der Vergangenheit – auch die der mesopotamischen Vorstellungen von Tod und Jenseits – Vandalismus und Plünderung zum Opfer. Bei Abfassung dieses Artikels galten nach vorsichtigen Schätzungen von Experten 3000 bis 5000 Stücke als verschwunden und noch mehr als beschädigt, darunter eine unersetzbare Bibliothek von Rollsiegeln (die oft in den Medien genannte Zahl 32 bezieht sich nur auf kunsthistorische Meisterstücke wie die Warka-Vase oder die »Mona Lisa« von Uruk). Viele Iraker entluden ihre Wut an Objekten, die sie mit dem Regime identifizieren konnten. Denn der Diktator Saddam Hussein glaubte sich in der Linie der babylonischen Herrscher stehend und wurde entsprechend auf Postern und Geldscheinen dargestellt. Darüber hinaus aber nutzten professionelle Kunsträuber die Gelegenheit, sich in Museen und auf Grabungsstätten zu bedienen. Vor allem die Zeugnisse der frühsumerischen Zeit scheinen einen lukrativen Markt gefunden zu haben, denn bei Raubgrabungen wurden Artefakte jüngeren Datums oft achtlos beiseite geworfen, um schnell an die älteren Schichten zu gelangen.

Bis dieser Beitrag erscheint, werden einige Wochen vergehen. Wir hoffen, dass es den Irakern und der internationalen Staatengemeinschaft bis dahin gelungen sein wird, dem Ausverkauf der Vergangenheit Mesopotamiens Einhalt zu gebieten. ◁

Die Theologin und Altorientalistin **Angelika Berlejung** und der Archäologe **Joachim Bretschneider** lehren an der Katholischen Universität in Leuven in Belgien.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Tod und Leben nach den Vorstellungen der Israeliten. Von A. Berlejung in: Das biblische Weltbild und seine altorientalischen Kontexte, B. Janowski und B. Ego (Hg.), Mohr Verlag, Forschungen zum Alten Testament, Band 32, Tübingen 2001, S. 465.

Untersuchungen zu den Bestattungssitten in Mesopotamien in der ersten Hälfte des ersten Jahrtausends v. Chr. Von B. M. Nasrabadi, Baghdader Forschungen, Band 23, Verlag Philipp von Zabern, Mainz 1999.

Gräber Assyrischer Königinnen aus Nimrud. Von M. Damerji in: Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums, Band 45/1998, Mainz 1999.

ÖKO TOX GMBH

Empfindlicher Biosensor

Von Katrin Schaller

Klares Wasser, reine Luft und saubere Erde sind in der modernen Welt alles andere als selbstverständlich: Aus Industrie, Müllverbrennungsanlagen und Krankenhäusern gelangen zahllose chemische Verbindungen ins Abwasser und in die Luft. Im Boden finden sich Rückstände aus der Landwirtschaft, von Deponien, aus Altlasten und dem Bergbau. Verschiedene biologische Tests mit Mikroorganismen, Tieren und Pflanzen helfen abzuschätzen, welche Substanzen in welcher Dosis die Gesundheit des Menschen gefährden. Die Stuttgarter ÖkoTox GmbH entwickelt solche Verfahren und bietet entsprechende Pflanzen wie Wasserlinse und Ackerschmalwand an. Als einziges europäisches Unternehmen hat sie für Genotoxizitätstests im Wasser, in der Luft und im Boden die Spinnwurz *(Tradescantia)* im Programm. Neuerdings versuchen Mobilfunkbetreiber damit sogar die Schädlichkeit elektromagnetischer Felder zu untersuchen.

Pflanzen als Alleskönner!

Schädigen giftige Substanzen oder Strahlung die Erbsubstanz der Pflanze, brechen in der ersten Teilungsphase der Pollenzellen der Spinnwurz kurze Stücke von der DNA ab. Diese sind unter dem Mikroskop als so genannte Kleinkerne zu sehen. Da der Vorgang der Zellteilung nicht artspezifisch ist, sondern in allen höheren Lebewesen stattfindet, lässt die Zahl dieser Kleinkerne Rückschlüsse auf die Wirkung im Menschen zu.

Ursprünglich wurde das Verfahren entwickelt, um die erbgutschädigende Wirkung radioaktiver Strahlung zu untersuchen; später nutzten es Forschungseinrichtungen für Genotoxizitätstests. Die Firmengründerinnen Heidrun Moser und Christina Pickl hoffen, dass es dank seiner Vorteile für potenzielle Auftraggeber immer interessanter wird: »Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) erwägt, den *Tradescantia*-Test zu standardisieren und für das Verfahren eine Richtlinie zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen zu erstellen.«

Der Kleinkern-Test mit *Tradescantia* steht in Konkurrenz zu etablierten Verfahren, die Mikroorganismen oder Zellkulturen einsetzen. Für die Arbeit mit Bakterien ist aber zumeist ein Sicherheitslabor nach dem Gentechnikgesetz erforderlich, denn die Testorganismen sind oftmals gentechnisch verändert und dürfen nicht ins Freie gelangen. Da sich Bakterien zudem in vielen Punkten stark vom Menschen unterscheiden, lassen sich Ergebnisse nur bedingt übertragen.

Gleiches gilt auch für Zellkulturen, selbst wenn mit menschlichen Zellen gearbeitet wird, da diese aus ihrer natürlichen Umgebung herausgerissen sind. Effekte, die erst durch Umwandlung im

Stichwort: Biologische Testverfahren

Wie sauber ist die Umwelt?

Gefährliche chemische Verbindungen, die Wasser, Boden oder Luft belasten, lassen sich durch chemische Analysen selbst in ausgesprochen geringen Konzentrationen nachweisen – sofern sie bereits bekannt sind. Doch solche Verfahren finden keine unbekannten Substanzen und geben auch keinerlei Auskunft über deren toxische Wirkung.

Anders verhält es sich bei biologischen Testverfahren. Hier werden Organismen den verunreinigten Medien und damit dem Chemikaliencocktail ausgesetzt. Werden diese Lebewesen geschädigt, ist das ein Hinweis zumindest auf die Gegenwart toxischer Substanzen. Auf diese Weise lässt sich die direkte Wirkung einer Verbindung testen; es werden aber auch synergistische und antagonistische Effekte sichtbar, die durch das Zusammenspiel mehrerer Verbindungen entstehen.

Aus der beobachteten akuten, chronischen oder genotoxischen Wirkung lässt sich auf das Gefährdungspotenzial der Testsubstanz schließen. Einzelne Biotests erkennen jedoch immer nur ein bestimmtes Spektrum möglicher Wirkungen: So werden beispielsweise bestimmte Stoffwechselwege gestört, die Beweglichkeit der **Testorganismen** eingeschränkt, deren Erbgut zerstört oder der Organismus getötet. Je nach Fragestellung setzt man Zellkulturen, Mikroorganismen, Algen, Pflanzen, Krebstiere oder Fische ein. Bei der Auswahl werden in der Regel Tests bevorzugt, die standardisiert sind und mit denen bereits umfangreiche Erfahrungen vorliegen; nach Möglichkeit sollten sie normiert sein.

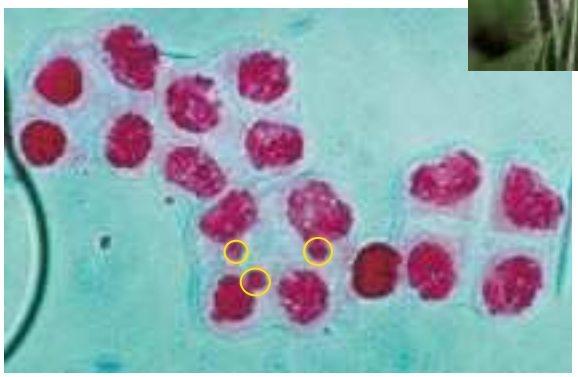
Wegen ihrer **hohen Anpassungsfähigkeit** eignen sich Pflanzen für die Untersuchung weitgehend unveränderter Proben: Sie sind unempfindlich gegen eine Färbung oder Trübung wässriger Lösungen und ertragen einen weiten pH-Bereich von 3,0 bis 9,0. Sie zeigen sowohl akute Effekte wie auch eine Langzeitwirkung an und können nicht nur im Labor, sondern auch für Freiland- und Arbeitsplatzuntersuchungen eingesetzt werden.

CORBIS

Die im heimischen Gartenteich meist wenig beliebte Wasserlinse ist ein einfach zu handhabender Biosensor, um schädliche Substanzen in Wasser nachzuweisen.

BEIDE ABBILDUNGEN: ÖKOTOX GMBH

Die Spinnwurz *(Tradescantia)* zeigt zuverlässig und reproduzierbar an, ob chemische Substanzen oder elektromagnetische Felder Schäden im Erbgut verursachen.



Genotoxische Substanzen oder Strahlen lassen von der DNA kleine Stücke abbrechen. Diese sind in einem bestimmten Knospenstadium als Kleinkerne sichtbar (hier durch gelbe Kreise markiert).

Körper entstehen, können sie nur unzureichend erfassen. Anders die Spinnwurz: Sie reagiert auch auf solche Substanzen, die ihre genotoxische Wirkung erst durch den Umbau im Stoffwechsel entfalten. Außerdem steht sie als höher entwickelter Organismus dem Menschen näher als Bakterien, das erhöht die Relevanz der Ergebnisse.

Für den leicht durchzuführenden Test werden am Tag vor der Untersuchung unter Standardbedingungen angezüchtete Pflanzen ausgewählt. Davon werden etwa 15 Zentimeter lange Blütenstände mit einem bestimmten Knospenstadium abgeschnitten und dann für sechs bis maximal dreißig Stunden der Testsubstanz oder dem elektromagnetischen Feld ausgesetzt.

Vom Industrieschlot zum Handymast

Besteht der Verdacht auf eine Kontamination des Bodens, pflanzt man die Spinnwurz direkt ein. Geht es um eine wasserlösliche Verbindung, werden die Schnittlinge in ein Becherglas mit der Lösung gestellt; die für andere Testverfahren meist erforderliche Klärung der Flüssigkeit und Änderung des pH-Werts entfällt. Soll ein Aerosol überprüft werden, stellt man die Schnittlinge lediglich ins fragliche Gelände, beispielsweise nahe einem Schornstein oder in einen Arbeitsraum. Zur Quantifizierung der Wirkung dient Spinnwurz, die unter Gewächshausbedingungen gedeiht, als Maß für die spontane Kleinkernbildung. Zudem werden Pflanzen einer Referenzsubstanz ausgesetzt, von der bekannt ist, dass sie eine erhöhte Kleinkernrate hervorruft.

Ob Handystrahlung Erbgut schädigen kann, soll die Spinnwurz ebenfalls beantworten. Derzeit entwickeln die beiden Firmengründerinnen in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben zusammen mit der Forschungsabteilung des Schweizerischen Telekommunikationsanbieters Swisscom und einem Berner Umweltberatungsunternehmen das Testverfahren dahingehend weiter. Eine Apparatur simuliert den Antennenbereich und erzeugt die gängigen GSM-Frequenzen in verschiedenen Intensitäten, Modulationen und Polarisierungen.

Jeweils zwölf Schnittlinge der Spinnwurz werden mehrere Stunden lang einer Variante des elektromagnetischen Felds ausgesetzt, danach dürfen sie sich einen Tag lang unbelastet weiterentwickeln. In dieser Zeit teilen sich die Pollenzellen und die Kleinkerne müssten, sofern eine toxische Wirkung vorliegt, unter dem Mikroskop sichtbar werden. Als Kontrollgruppe dienen Pflanzen in einem vor der Strahlung abschirmenden Faraday-Käfig. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen in Kürze publiziert werden, das Projekt wird mit UMTS-Frequenzen fortgeführt. ◁

Katrin Schaller ist promovierte Biologin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin bei Heidelberg.

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

Forschungszentrum Jülich
Brennstoffzellen
Technologie, Jobs,
Dissertationen, Diplomarbeiten
www.fuelcells.de/jobs

Forum MedizinTechnik und Pharma in Bayern e. V.
Innovationen für die Medizin
www.forum-medtech-pharma.de

Kernmechanik – die neue Quantenphysik von Kernspin bis Kosmologie
www.kernmechanik.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 80,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon (02 11) 887-23 94
E-Mail: m.grigo@vhb.de

PHYSIKERINNEN IN DEUTSCHLAND

Der große kleine Unterschied

Immer mehr Frauen in Deutschland studieren Physik. Hoch motivierte, qualifizierte und engagierte Physikerinnen starten in ihr Berufsleben. Doch in Führungspositionen sind sie weiterhin unterrepräsentiert.

Von Monika Bessenrodt-Weberpals

Experimentieren und Entdecken gehört zu den Lieblingsbeschäftigungen von Grundschülern – Mädchen wie Jungen gleichermaßen. Leuchtende Kinderaugen beobachten die Welt durch das erste selbst gebaute Periskop. Lernend mit allen Sinnen erforschen sie die Natur. Doch nur wenige Jahre später erscheint Schulkindern, und besonders Mädchen, das Schulfach Physik nicht sonderlich attraktiv. Eine Umfrage zum Image der Physik hat gezeigt: Jugendliche halten Personen, die sich für dieses Fach interessieren, im Allgemeinen für verklemmt, schlecht gekleidet – und männlich.

Was ist zwischen diesen Altersstufen passiert? Weshalb wählen naturbegeisterte Mädchen so selten einen Leistungskurs in Physik? Warum studieren so wenige Frauen dieses Fach, das hohes Ansehen und sehr gute Karriereaussichten bietet?

Wie eine aktuelle Studie der Universität Michigan in Ann Arbor belegt, wählen Mädchen und junge Frauen ihr Lieblingsfach häufig danach aus, ob sie darin etwas mit und für Menschen bewirken können. Zudem haben Frauen ein sehr breites und vielseitiges naturwissenschaftliches und technisches Interesse. Aber leider kommt dieser Gesichtspunkt in dem üblichen Physikunterricht oder in den Physiklehrbüchern entschieden zu kurz.

Dabei bieten Alltagsphysik und Fächer übergreifender Unterricht eine Fülle von Beispielen, die Mädchen genauso ansprechen wie Jungen. Luft und Wasser begeistern beide Geschlechter, Fahrrad und CD-Spieler ebenso. Prominenten Wissenschaftspaaren wie den Curies nachzuspüren vereint fachübergreifend Physik- und Chemie-, Geschichts- und Französischunterricht. Für das Selbstbild der Mädchen spielen in diesem Zusammenhang auch weibliche Vorbilder in Gestalt von Physiklehrerinnen eine wichtige Rolle. Sie können die Mädchen in ihrem Interesse an den Naturwissenschaften bestärken und fördern. Das ist umso wichtiger, weil Physikerinnen weit häufiger als ihre männlichen Kollegen berichten, dass ihnen von einem Physikstudium abgeraten wurde. Dieses ist nur einer von vielen erstaunlichen Befunden, die eine vom Arbeitskreis Chancengleichheit (AKC) der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) initiierte Umfrage zum Thema »Physikerinnen und Physiker im Beruf« zu Tage förderte (»Physik Journal«, Februar 2002, S.22, oder online unter www.physikerin.de/umfrage.html).

High Potentials für die Physik

Tatsächlich begeistern sich inzwischen immer mehr junge Frauen für ein Physikstudium, wenngleich ihr Anteil immer noch deutlich unter 49 Prozent liegt, dem Frauenanteil im Durchschnitt aller Fächer. Wegen ihres breit und innovativ angelegten Interesses bevorzugen Frauen im Studium Vertiefungen wie Polymerphysik oder Astrophysik und interdisziplinäre Studiengänge wie Biophysik oder Medizinische Physik. Ihre Studienerfolge und Berufsaussichten sind dabei überdurchschnittlich gut. Um das Selbstbewusstsein dieser jungen Frauen in der männerdominierten Welt der Physik zu stärken, bietet sich Mentoring an, auch um ihren Blick für strukturelle Benachteiligungen zu schärfen. Zum Beispiel betreuen Studentinnen als Mentorinnen Schülerinnen und profitieren gleichzeitig als Mentees von den Erfahrungen und Beziehungen ihrer akademisch höher qualifizierten Kolleginnen.

Die weitere akademische Ausbildung der Physikabsolventinnen verläuft auf jeden Fall sehr zielstrebig. Frauen erarbeiten sich nicht nur zehn Prozent aller Diplome, sondern auch zehn Prozent aller Promotionen und acht Prozent aller Habilitationen in Physik, was auf hoch motivierte, qualifizierte und engagierte Wissenschaftlerinnen hinweist: *High Potentials* für die Physik! Damit unterscheidet sich dieses naturwissenschaftliche Fach fundamental vom Durchschnitt aller Fächer, bei dem sich der Frauenanteil von 46 Prozent beim Studienabschluss über 34 Prozent bei der Promotion bis auf 18 Prozent bei der Habilitation mehr als halbiert.

Bedeutet dieser Fortschritt in der akademischen Ausbildung nun auch, dass Physikerinnen und Physiker im Beruf die gleichen Chancen erhalten? Dieser Frage ist die Umfrage des AKC ebenfalls nachgegangen. Die Ergebnisse belegen, dass Physikerinnen viel seltener als Physiker leitende Positionen und die damit verbundenen Spitzengehälter erreichen – unabhängig davon, ob diese Frauen Kinder haben.

Im Durchschnitt beträgt der Einkommensvorsprung von Physikern gegenüber ihren weiblichen Kollegen 25 Prozent; die Differenz im Bruttoeinkommen beträgt bei den habilitierten Vollzeittätigen etwa 1000 Euro pro Monat. Ganz oben auf der Gehaltsskala stehen Physiker mit Kindern, während sich Physikerinnen mit Kindern ganz unten wie-

UNIVERSUM SCIENCE CENTER, BREMEN

Wo bitte geht's zur Karriereleiter? Viele Physikerinnen werden bei ihrem beruflichen Aufstieg ausgebremst.

derfinden. Allerdings verdienen kinderlose Physikerinnen nur unwesentlich mehr als ihre Kolleginnen mit Nachwuchs. Von einer »Karrierebremse Kind« kann also keine Rede sein. Im Übrigen stellt die AKC-Umfrage auch fest, dass Physikerinnen häufiger als Physiker ganz auf Nachwuchs verzichten: Bei den über 45-Jährigen haben nur 49 Prozent der Physiker in der DPG keine Kinder, aber siebzig Prozent der Physikerinnen. Des Weiteren leben Physikerinnen überwiegend in Akademikerpaaren (so genannten *Dual Career Couples*, DCCs), die als privilegierte Minderheit gelten und mit Anti-Nepotismus-Regeln an einer gemeinsamen Berufsausübung gehindert werden. Ähnliche Ergebnisse werden zum Beispiel vom Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin oder vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge berichtet (online zugänglich unter http://web.mit.edu/fnl/women/).

Offensichtlich spielen die individuellen Entscheidungen der Physikerinnen (zum Beispiel für oder gegen Kinder) nur eine sehr geringe Rolle – entgegen den allgemeinen Erwartungen, auch jüngerer Wissenschaftlerinnen.

Entscheidend scheint hier zu Lande etwas anderes zu sein: Selbst wenn hoch motivierte Physikerinnen ihr Können unter Beweis gestellt haben, wird es häufig von ihren Vorgesetzten und Kollegen weniger anerkannt. Ursache ist, dass Frauen die Entscheidung »Familie oder Beruf?« zugeschoben und ihnen geringerer beruflicher Ehrgeiz zugeschrieben wird als Männern, denen im traditionellen Gesellschaftsbild noch immer die Rolle des Ernährers zukommt und für die deshalb »Familie und Beruf« der selbstverständliche Lebensentwurf zu sein scheint. Wie die AKC-Umfrage ergab, fördern Vorgesetzte ihre Mitarbeiterinnen darum deutlich weniger als ihre männlichen Mitarbeiter – beispielsweise, indem sie Frauen seltener auffordern, auf einer Tagung vorzutragen oder etwas zu veröffentlichen.

Vom schwachen Geschlecht wird besondere Stärke erwartet

Paradigmatisch zeigt auch eine Statistik der eingeladenen Vorträge bei den jährlichen Frühjahrstagungen der DPG einen Frauenanteil von nur 4,3 Prozent – ohne ansteigende Tendenz im Laufe der Jahre. Die MIT-Studie weist zudem auf die subtile und zugleich nachdrückliche Häufung von Nachteilen etwa bei Gehalt, Raumausstattung und Auszeichnungen hin. Diese während des beruflichen Aufstieges erlebten Benachteiligungen demotivieren die Wissenschaftlerinnen nicht nur, sondern bremsen sie letztlich auch aus.

Ferner hat eine schwedische Studie offen gelegt, dass Männer und Frauen mit gleicher fachlicher Kompetenz, gemessen an Zahl und Qualität der Publikationen, sehr unterschiedlich bewertet werden: Die am besten bewerteten Frauen liegen in etwa gleichauf mit den am schlechtesten bewerteten Männern. Um die gleiche Bewertung zu erhalten, hätten die Frauen 2,5-mal produktiver sein müssen als gleich qualifizierte Männer. Sie können also nur Karriere machen, wenn sie überdurchschnittliche Leistungen erbringen: Das vermeintlich schwache Geschlecht muss offenbar besonders stark sein.

Tatsächlich folgen alarmierende Zahlen für die Leitungspositionen im Hochschulbereich: An deutschen Hochschulen werden nur knapp drei Prozent aller Professuren im Fach Physik von Frauen besetzt – damit gehört die Bundesrepublik international zu den Schlusslichtern. ▷

▷ Führend ist Portugal mit einem prozentualen Frauenanteil von 26 Prozent an den Physikprofessuren, gefolgt von der Türkei mit elf Prozent. Frankreich hat mit immerhin knapp neun Prozent dreimal so viele Frauen auf Physikprofessuren wie Deutschland. In den USA sind zwar auch zehn Prozent aller »Associate Professors« weiblich, aber nur 3,6 Prozent aller »Full Professors«. Und in der Wirtschaft sieht es im Allgemeinen auch nicht besser aus, da Frauen nur etwa halb so viele Führungspositionen besetzen wie im akademischen Bereich.

Wie können wir an diesem Zustand etwas ändern? Und mit welchen praktischen Maßnahmen?

Ziel ist eine ganzheitliche Wahrnehmung und Förderung des (Hochschul-) Personals und damit ein Klima, das Physikerinnen und Physikern gerecht wird und es beiden erleichtert, Familie und Beruf zu vereinbaren. Jeder Lehrstuhl und jeder Fachbereich Physik kann Profil bildend und kostenneutral handeln, indem er mehr Physikerinnen zu Vorträgen ins Kolloquium einlädt, für Auszeichnungen vorschlägt und auf freie Stellen beruft. Analoges gilt für die Wirtschaft, indem sie zum Beispiel die Familienphase als zeitlich begrenzte Reduktion der Erwerbstätigkeit der *High Potentials* betrachtet.

Die DPG ihrerseits hat 2002 den jährlich zu vergebenden Hertha-Sponer-Preis eingeführt, um Nachwuchswissenschaftlerinnen zu fördern und zu einer akademischen Laufbahn zu ermutigen. Benannt ist die Auszeichnung nach einer der ersten Frauen in Deutschland, die sich in Physik habilitierten. Die International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), der Dachverband der physikalischen Gesellschaften weltweit, hat umfassende Resolutionen formuliert, um eine gerechte Beteiligung von Physikerinnen zu erreichen. Beispielsweise sollen Sprache und Bildmaterial geschlechtergerecht verwendet werden. Statt der Länge der Arbeitszeit oder der Zahl der Publikationen sollte die Qualität der Arbeit den Ausschlag geben. Starre Altersgrenzen bei Stellenbesetzungen, Stipendien oder Auszeichnungen sind durch das Konzept eines akademischen Alters zu ersetzen, das zum Beispiel Kinderbetreuungszeiten berücksichtigt. Rahmenrichtlinien für *Dual Career Couples* würden gegenüber Einzelfalllösungen viel bewirken, wie es amerikanische Universitäten seit vielen Jahren erfolgreich praktizieren.

Die internationale Schieflage spielt inzwischen auch eine wichtige Rolle beim Wettbewerb um die besten Köpfe, wie Klaus Landfried, Präsident der Hochschulrektorenkonferenz (HRK), erläuterte. Die HRK hatte ihre diesjährige Jahresversammlung in Dresden unter das Motto »Frauen in der Wissenschaft« gestellt. Denn: »In Deutschland ist die Chancengleichheit von Frauen im Wissenschaftsbetrieb noch lange nicht erreicht. … Dabei geht es nicht nur um die Verwirklichung eines Grundrechts, sondern auch um die Nutzung eines originären Potenzials für Wissenschaft und Gesellschaft.« Und weiter heißt es: »Die mäßigen Fortschritte der letzten 15 Jahre können nicht befriedigen, zumal andere Länder beweisen, dass es besser geht. … Die Hochschulen müssen dazu kommen, Frauenförderung und Familienorientierung in ihrem Zielsystem zu verankern, entsprechende Maßnahmen zu ergreifen und diese als Profil bildend zu verstehen und zu nutzen.«

Hoch qualifizierte Physikerinnen stehen dafür bereit! ◁

Monika Bessenrodt-Weberpals forscht als Physikerin am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München und lehrt als Professorin für Physik an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Sie ist Sprecherin des Arbeitskreises Chancengleichheit der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.
Weitere Informationen im Internet unter der Adresse www.physikerin.de

RAKETENABWEHR

Vermeintlicher Schutzschild

Es klingt so einfach: Feindliche Raketen werden kurz nach ihrem Start abgefangen, bevor sie das eigene Territorium erreichen. Doch funktionieren wird eine solche *boost phase defense* nie, meinen Physiker.

Von Thorsten Krome

Die Idee ist nicht neu: Bereits in den 1960er Jahren begannen die USA ein Abwehrsystem zu entwickeln, das mit nuklear bestückten Abfangraketen vor sowjetischen und chinesischen Interkontinentalraketen schützen sollte. Doch Wissenschaftler zweifelten schon damals die Machbarkeit und Wirksamkeit von »Safeguard« an. Und ein Abkommen mit der Sowjetunion über die Begrenzung der Systeme zur Abwehr ballistischer Flugkörper (ABM-Vertrag) sowie technische Probleme machten die Weiterentwicklung der Raketenabwehr in den 1970er Jahren schnell obsolet.

Auch Ronald Reagans Vision von einer Raketenabwehr im Weltraum, SDI (Strategic Defense Initiative), aus den frühen 1980er Jahren verschwand nach Zusammenbruch und Selbstauflösung des Ostblocks zunächst einmal in den Schubladen. Es dauerte jedoch nicht lang, bis neue Bedrohungsszenarien ausgemacht waren. Missliebige Nationen, »Schurkenstaaten«, rückten auf den Plan von Militärstrategen. So sah sich denn US-Präsident Bill Clinton seit 1994 einer republikanischen Kongressmehrheit gegenüber, die mit Nachdruck das Ziel einer nationalen Raketenabwehr verfolgte. Die endgültige Entscheidung über das Projekt überließ Clinton seinem Nachfolger im Amt: George W. Bush. Spätestens seit dieser im Dezember 2001 ankündigte, dass sich die USA aus dem fast dreißig Jahre alten ABM-Vertrag zurückziehen, scheint nun der Weg frei für eine nationale Raketenabwehr (National Missile Defense) der Amerikaner.

Ein wesentlicher Bestandteil dieses Systems, das eigentlich schon in den nächsten Jahren für Schutz sorgen soll, ist die frühzeitige Zerstörung der Interkontinentalraketen direkt nach dem Start: die *boost phase defense*. Physiker haben sich immer wieder kritisch mit den technischen Schwierigkeiten und den destabilisierenden Folgen einer solchen Raketenabwehr auseinander gesetzt (siehe Spektrum der Wissenschaft, 11/1999, S. 66, 9/2000, S. 92, 9/2001, S. 86).

Nun haben sich Wissenschaftler der American Physical Society (APS) unabhängig von staatlichen Organen mit der Machbarkeit dieses Vorhabens befasst und Mitte Juli einen mehr als 400 Seiten starken Bericht vorgelegt. Dabei betrachteten die beteiligten Forscher sowohl land-, see- und luftgestützte Abfangsysteme als auch Systeme im All sowie luftge-

stützte Laser. Das Ergebnis der Studie dürfte für die Verfechter einer nationalen Raketenabwehr ernüchternd sein: Ein frühzeitiges Abfangen von Raketen kurz nach dem Start kann keinen effektiven Schutz vor den wichtigsten feindlichen Raketentypen bieten.

Das Hauptproblem ist das enge Zeitfenster, in dem Gegenmaßnahmen greifen müssten (siehe Grafik): »Nur zwei bis drei Minuten stehen zur Verfügung, um eine Rakete in der Startphase abzufangen, selbst wenn man voraussetzt, dass große Fortschritte bei den Erkennungs- und Verfolgungssystemen gemacht werden«, erklärt Frederick Lamb, Direktor des Zentrums für Theoretische Physik in Illinois. Abfangsysteme müssten deshalb in der Nähe einer möglichen Raketenabschussbasis stationiert sein – nicht weiter als 400, maximal 1000 Kilometer davon entfernt. In vielen Fällen wäre das näher, als die politische Landkarte erlaubt.

Zerplatzende Träume

Im Ernstfall müssten die Verteidiger vermutlich eine Entscheidung über den Abschuss einer Rakete treffen, noch bevor sie wüssten, ob es sich um einen echten Angriff handelt oder lediglich um eine Weltraummission, vermutet Lamb. Außerdem wären Abfangraketen nur gegen vergleichsweise lang brennende Flüssigtreibstoffraketen von Nutzen. Gegen die schnell brennenden Feststoffraketen hätte ein solches Abwehrsystem keine Chance. Doch eben jene Feststoffraketen könnten den als Schurkenstaaten bezeichneten üblichen Verdächtigen in zehn bis 15 Jahren zur Verfügung stehen – zumindest, wenn man US-Geheimdienstberichten Glauben schenkt. Die gleiche Zeit bräuchten die USA voraussichtlich, um überhaupt eine Raketenabwehr zu installieren, die dann aber nur einen gewissen Schutz vor den Flüssigtreibstoffraketen bietet. Die neuen Schnellstarter hingegen würden durch die weiten Maschen des Abwehrnetzes schlüpfen.

Auch im All stationierte Abfangsysteme hätten der Studie zufolge mit dem engen Zeitfenster zu kämpfen. Es bedürfte einer Flotte Tausender von Satelliten, nur um eine einzige Rakete abzufangen. Allein um all diese Satelliten in Erdumlaufbahnen zu bringen, müssten die Vereinigten Staaten ihre Raumfahrtkapazitäten um das Fünf- bis Zehnfache erhöhen, so rechnen die Physiker vor.

AMERICAN PHYSICAL SOCIETY

Weniger als 240 Sekunden Zeit: Die Flugbahnen zeigen, wo eine von Nordkorea aus abgefeuerte Interkontinentalrakete mit Flüssigkeitstriebwerk niederginge, wenn ihre Antriebsstufe zu einer bestimmten Zeit nach dem Start (in Sekunden) außer Gefecht gesetzt werden würde.

Von luftgestützten Lasersystemen versprechen sich die Experten ebenfalls keinen ausreichenden Erfolg. Zwar könnten diese lichtschnellen Abwehrwaffen auf kurzer Entfernung gegen Flüssigtreibstoffraketen durchaus etwas ausrichten. Doch über große Distanzen könne nicht genügend Energie auf der Angreiferrakete deponiert werden – schon gar nicht, wenn sie mit festem Treibstoff angetrieben würde. Zudem seien die Laser, die beispielsweise auf Flugzeugen installiert werden sollen, nicht vor Gegenmaßnahmen des Aggressors gefeit.

Alles in allem lässt die Studie, die im Übrigen von der Homepage der APS (www.aps.org) vollständig heruntergeladen werden kann, wenig Spielraum für militärische Träumereien. William Brinkman, ehemaliger Präsident der APS, meint: »[Diese Studie] sollte es jedem ermöglichen, seine eigenen Schlussfolgerungen zu ziehen. Und die Schlüsse sind ziemlich klar für jeden, der sie sehen möchte.« ◁

Thorsten Krome ist Redakteur bei Wissenschaft Online in Heidelberg.

KOMMENTAR

Auf der Suche nach der Wahrheit

Das Verhältnis zwischen PR und Wissenschaftsjournalismus ist schwierig.

O tempora, o mores! Unvorstellbar, dass Alexander von Humboldt seine »Ansichten der Natur« zu fünfzig Prozent auf Basis von Pressemitteilungen geschrieben hätte! Doch da sind wir mittlerweile angelangt, wie die Kommunikationswissenschaftlerin Claudia Mast von der Universität Stuttgart-Hohenheim belegt. Sie spricht auch generell von einer sich seit Jahren verschiebenden Machtbalance. Bei den Journalisten sei Schmalhans Küchenmeister, dafür boome die Public-Relations-Branche. Aktueller Stand: Über alle Ressorts kommen im Mittel auf vier PR-Leute in Deutschland noch sieben fest angestellte Journalisten, während es in den USA bloß noch drei sind – Tendenz fallend.

Standen bei Humboldt authentischer Bericht und Glaubwürdigkeit obenan, regiert heute in den meisten Redaktionsstuben der Kommerz. Zeit- und Kostendruck belasten journalistische Qualität und Rechtschaffenheit. In dieser Situation kommt die Pressemeldung gerade recht. Spalten lassen sich termingerecht füllen, vorausgesetzt, es fragt keiner nach Hintergründen oder alternativen Meinungen. So geht die lancierte Verlautbarung als journalistisches Produkt durch und wird der Öffentlichkeit für bare Münze verkauft. Auf der Strecke bleiben Objektivität, Unabhängigkeit, die eigene Meinung – und letztlich die Glaubwürdigkeit.

Denn Neutralität und Ausgewogenheit sind, einer Befragung der Agentur Kothes-Klewes zufolge, bei PR-Agenturen nur zu fünfzig Prozent zu erwarten. Von den Journalisten verlangt man gemäß der Studie immerhin über neunzig Prozent. Journalistische Qualitäten sind jedoch nur mit Zeit, Geld und guter Ausbildung zu erreichen. An der Ausbildung feilen alle – Bildungseinrichtungen genauso wie die Journalisten selbst. Doch Zeit, Geld und Personalstellen werden auf dieser Seite immer knapper.

Das gilt insbesondere da, wo das Themenspektrum von Tag zu Tag breiter und die Sachverhalte immer komplizierter werden – im Wissenschaftsjournalismus.

Vor allem Themengenerierung und Sachkompetenz stoßen in den eher kleinen Wissenschaftsressorts rasch an Grenzen. So ist man auch da immer mehr auf die Zuarbeit anderer angewiesen: auf Pressestellen, Sekundärquellen, freie Journalisten und schlecht bezahlte Praktikanten. Das belegte kürzlich auch eine gemeinsame Untersuchung von Bertelsmann-Stiftung, Volkswagen-Stiftung und BASF über den Wissenschaftsjournalismus in Zeitungen. Der Anteil selbst recherchierter Beiträge beispielsweise aus dem Themenfeld »Life Science« liegt nach Auskunft der Redakteure gerade noch bei fünfzig Prozent. Ihre Themenideen beziehen die Wissenschaftsredakteure in der Regel von Nachrichtenagenturen oder Fachveröffentlichungen, wohingegen wissenschaftlich geschulte Freiberufler noch eher originäre oder wissenschaftsnahe Quellen nutzen, etwa in Gesprächen mit Wissenschaftlern oder auf Fachtagungen.

Dazu kommt, so befürchtet Claudia Mast, dass sich heutiger Wissenschaftsjournalismus unter dem Kostendiktat leichter dem Publikumsgeschmack unterordnet und eher emotionale, metaphysische Themen bevorzugt, als wissenschaftlich korrekt und verständlich über »harte« Themen zu berichten.

Es könnte so schön sein: PR-Branche und Journalisten würden an einem Strang ziehen und der Öffentlichkeit Raum und Zeit erklären. Nach Kothes-Klewes halten über neunzig Prozent der PR-Leute die Redaktionen für Partner, die sie unterstützen. Bei den Journalisten denken umgekehrt immerhin noch 68 Prozent so über ihr Gegenüber in der Firmenpressestelle. Doch Idealismus und Materialismus sind immer schon unversöhnliche Antipoden. Einer wird auf der Strecke bleiben.

Reinhard Löser

Der Autor, promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt, arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Stuttgart.

WISSENSCHAFT ALLGEMEIN

Peter Tallack (Hg.)

Meilensteine der Wissenschaft

Aus dem Englischen von Monika Niehaus-Osterloh, Jorunn Wissmann, Peter Wittmann, Andrea Kamphuis und Martina Wiese.
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2002. 528 Seiten, € 49,95.

Wie viele bemerkenswerte (natur)wissenschaftliche Erkenntnisse und Ereignisse gibt es von den frühesten Entdeckungen bis heute? Nach mühevoller Auswahl kommt der Herausgeber Peter Tallack auf 250 Stück; und bei aller unvermeidlichen Willkür ist ihm die Selektion so gut gelungen, wie dies wohl möglich ist. Der Ausbruch des Mt. St. Helens steht dann eben gleichberechtigt neben der Relativitätstheorie.

Trotzdem vermittelt das Werk tatsächlich einen Überblick über die Wissenschaftsgeschichte und ermöglicht es, viele Geschehnisse in einen größeren Zusammenhang einzuordnen. Dabei helfen auch die vielen Querverweise am Ende jedes Artikels.

Das Werk »De rerum fossilium« des Schweizer Naturforschers Conrad Gesner (1516–1565) gilt als Beginn der wissenschaftlichen Paläontologie – auch wenn Gesner manche Ammoniten fälschlich für spiralförmige Schlangen hielt.

Das Buch ist nach einem streng durchgehaltenen Schema aufgebaut. In chronologischer Folge wird jeder Entdeckung bzw. jedem Ereignis genau eine Doppelseite gewidmet: links der Text, rechts eine ganzseitige Abbildung dazu. So ist der Erklärung von Euklids »Elementen« eine Seite aus der 1482 in Venedig erschienenen ersten gedruckten Ausgabe des Werks beigefügt.

Die Artikel sind für Laien gedacht und sehr allgemeinverständlich gehalten. Trotzdem sind die wissenschaftlichen Darstellungen meist präzise und zutreffend. Schließlich ist der Herausgeber selbst Naturwissenschaftler und ehemaliger Redakteur des renommierten englischen Wissenschaftsmagazins »Nature«. Die Texte stammen ebenfalls aus der Feder gestandener Wissenschaftsjournalisten. Garniert ist das Ganze noch mit acht zweiseitigen Essays zu ausgesuchten »herausragenden intellektuellen Leistungen«, geschrieben von Experten wie dem Paläoanthropologen Richard Leakey (»Die ersten Menschen«) und dem Mathematiker Ian Stewart (»Die Infinitesimalrechnung«).

»Meilensteine der Wissenschaft« ist wuchtig, aber keinesfalls abschreckend. Durch die Gestaltung mit kurzen Texten und großformatigen Bildern wirkt es sehr gefällig, bietet etwas fürs Auge und verführt sofort zum Stöbern. Allerdings fehlt der Platz, um auch nur etwas tiefer gehende Informationen unterbringen: Die einzelnen Artikel sind kürzer als so mancher Lexikoneintrag. Da helfen auch die ebenfalls relativ kurzen Essays nicht. Und so schön und ansprechend die großformatigen Bilder auch sein mögen – in vielen Fällen sind sie reine Dekoration, die zum Verständnis nichts und zur Darstellung des Themas wenig beiträgt. Wenn der Erforschung der Wahrscheinlichkeiten durch Pascal und Fermat das Gemälde »Der Falschspieler« zugeordnet wird, hilft auch der Hinweis nicht, dass die damaligen Spieler über Wahrscheinlichkeiten kaum Bescheid wussten.

Wen solches nicht stört, der hat in »Meilensteine der Wissenschaft« einen wirklichen Prachtband gefunden.

Elke Reinecke

Die Rezensentin ist Redakteurin bei Wissenschaft Online in Heidelberg.

MARTIN DOHRN

QUANTENPHYSIK

Anton Zeilinger

Einsteins Schleier

Die neue Welt der Quantenphysik

C. H. Beck, München 2003. 237 Seiten, € 19,90

Warum faszinieren uns Resultate der physikalischen Grundlagenforschung? Wir möchten die Natur verstehen, wir wüssten gern, wie die Welt funktioniert, in der wir leben. Das große Versprechen der Naturwissenschaft heißt Komplexitätsreduktion: Die verwirrende Vielfalt der Erscheinungen soll auf immer weniger Grundprinzipien, Formeln, Elementarteilchen zurückgeführt werden.

Doch die aktuelle Lage ist unübersichtlich. Die »Theorie von Allem«, die einheitliche Weltformel für alle Teilchen und ihre Wechselwirkungen, zeichnet sich nicht einmal in Umrissen ab, auch wenn Generationen von Physikern – zuletzt Stephen Hawking – immer wieder das große Ziel zum Greifen nah wähnten. Zwei mächtige Theoriegebäude stehen unversöhnt nebeneinander: Einsteins Relativitätstheorie beschreibt eine schwache Kraft unendlicher Reichweite, die Gravitation, und somit das Verhalten großer Massen. Die Quantentheorie ist eher zuständig für die Materie im Kleinen; sie ist darin so erfolgreich, dass die Physiker überzeugt sind, die künftige Theorie von Allem könne nur über eine Quantisierung der Gravitation gelingen. Die endgültige Theorie wird eine Quantentheorie sein.

Quantenphysik ist tatsächlich so seltsam, wie die Theorie vorhersagt

Insofern ist es doppelt peinlich, dass bis heute niemand die Quantentheorie wirklich »versteht«. Die Haltung der meisten Forscher dazu ist rein pragmatisch: Da die Theorie in der Praxis ungeheuer erfolgreich ist, findet man sich mit ihrem kontra-intuitiven Wesen ab.

Der österreichische Physiker Anton Zeilinger hat in den letzten Jahren durch eine Serie Aufsehen erregender Experimente demonstriert, dass die Quantenphysik so seltsam ist, wie die Theorie vorhersagt. Es gelang ihm, mehrere Gedankenexperimente, die im Laufe des historischen Streits um die »richtige« Interpretation ersonnen worden waren, praktisch durchzuführen. Das Ergebnis: Quantensysteme verhalten sich wirklich ganz anders, als wir es von Objekten des Alltags gewohnt sind. Die herrschende Theorie des Mikrokosmos ist zugleich erfolgreich und unbegreiflich. Hinter dem »Schleier«, von dem Einstein in der Entstehungsphase der Quantenphysik sprach, erblicken wir etwas, das unserem gewohnten Verständnis von Wirklichkeit widerspricht.

Wir sind gewohnt, dass ein Ding ist, wie es ist – unabhängig davon, ob und wie wir es messen. Doch Quantensysteme existieren als Superpositionen mehrerer möglicher Zustände, und erst der Messvorgang entscheidet, welcher Zustand wirklich eintritt. Zeilinger erzeugte im Labor so genannte verschränkte Zustände, in denen zwei Teilchen über große Entfernungen als einheitliches Quantensystem agieren. Wird der eine Partner gemessen, so nimmt nicht nur er einen der theoretisch möglichen Werte an, sondern auch der Zustand des anderen Partners zeigt augenblicklich den entsprechenden Wert. Das heißt, der zweite Partner entscheidet sich für ein bestimmtes unter mehreren möglichen Messresultaten, obwohl an ihm gar keine Messung durchgeführt wurde.

Die Verschränkung wiederum nutzte Zeilinger, um die so genannte Teleportation zu demonstrieren – früher eine bloße Science-Fiction-Idee. Es gelang ihm, ein einzelnes Lichtquant an einem Ort zusammen mit einem Partner eines verschränkten Teilchenpaars zu messen und dadurch augenblicklich an einem – theoretisch beliebig weit – entfernten Ort ein identisches Lichtquant zu erzeugen. Unterdessen beherrscht Zeilingers Team an der Universität Wien das Kunststück, Teilchen quer über die Donau zu teleportieren oder Quantenverhalten an Fulleren-Molekülen aus sechzig Kohlenstoffatomen – also an dafür ungewöhnlich großen Objekten – zu demonstrieren.

In seinem Buch versucht Zeilinger nun, in möglichst einfachen Worten seine Experimente zu erläutern und in den Rahmen der Quantentheorie zu stellen. Er verzichtet auf Formeln und Diagram- ▷

STERNE UND WELTRAUM –

Monat für Monat eine umfassende Weltraumperspektive

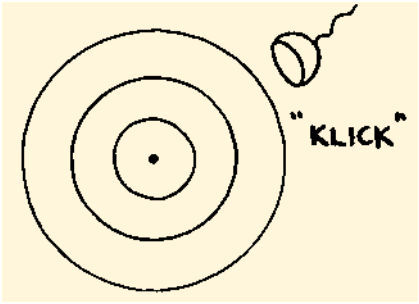
STERNE UND WELTRAUM ist die führende Zeitschrift für Astronomie in Deutschland.

Wesentlich tiefer gehend als die populärwissenschaftliche Presse, berichtet sie nicht nur über die herausragenden Entdeckungen und die daran beteiligten Wissenschaftler, sondern auch über deren Hintergründe. Zudem wird ein umfassender Einblick in nahezu alle Aspekte der astronomischen Forschungsarbeit gewährt.

www.suw-online.de

▷ me, sucht mit einfachen Skizzen auszukommen; die Sprache ist die eines mündlichen Vortrags für Laien. Stets ist er bemüht, Schritt für Schritt nachvollziehbar vorzugehen. Der Leser ist dafür dankbar, denn die dargestellten Zusammenhänge sind schon kompliziert genug.

In der Regel gelingt das Vorhaben. Nur selten stößt die Umgangsprache an ihre Grenzen, so wenn Zeilinger an einer wichtigen Stelle die Quintessenz des Bell'schen Theorems darstellen möchte. Dabei geht es um einen quantentheoretisch und wissenschaftshistorisch entscheidenden Punkt: John S. Bell zeigte 1964 zur allgemeinen Überraschung, dass es einen empirischen Test dafür gibt, ob die Verschränkung zweier Quantenteilchen prinzipiell im Rahmen der klassischen Physik erklärt werden kann oder nicht. Und nun lässt Zeilinger die Katze aus dem Sack: »Und zwar sagt die Quantenphysik, dass für kleine Winkel [zwischen zwei Spinmessgeräten] die Korrelationen fast nicht abnehmen, die Abnahme aber dann mit zunehmendem Winkel zwischen den beiden Richtungen stärker wächst.« Der Leser kann nicht folgen. Das mit der stärker wachsenden Abnahme wäre anhand eines simplen Diagramms sofort einsichtig; die sprachliche Umschreibung aber versagt, als wollte Zeilinger einem Blinden Farben veranschaulichen.



Eine sehr kleine Quelle sendet Licht aus, das sich kugelförmig im Raum ausbreitet. Wenn der Detektor ein einzelnes Photon registriert – was ist mit dem Rest der Kugelwelle? Welchen Sinn hat diese »Gespensterwelle«, wie Albert Einstein sie bezeichnete?

Im letzten Kapitel diskutiert Zeilinger übliche Versuche, die Quantentheorie zu interpretieren. Er bekennt sich eindeutig zur ursprünglichen »Kopenhagener Deutung« von Niels Bohr und Werner Heisenberg; heute oft diskutierte Deutungen wie die Vielwelten-Theorie und vor allem das Dekohärenz-Modell tut er mit wenigen Worten ab; das geht ein wenig auf Kosten der Fairness.

Als naturphilosophische Quintessenz seiner Erfahrungen mit der Quantenphysik kommt Zeilinger zu dem Schluss: »Wirklichkeit und Information sind dasselbe.« Da er zuvor schreibt, Information sei »letztlich nichts anderes als Antworten auf Fragen, die wir stellen«, gerät er in Gefahr, die Physik in etwas Willkürliches oder vom Bewusstsein des Beobachters Abhängiges aufzulösen. Mit diesem nahe liegenden Einwand setzt er sich auf den letzten Seiten allerdings explizit auseinander und meint, dass die Information »offenbar in gewisser Weise auch unabhängig vom Beobachter besteht.«

Mir kommt Zeilingers Deutung trotz dieses etwas gequälten Bekenntnisses zur Objektivität doch sehr subjektivistisch vor. Er geht sogar so weit, die Quantelung der Natur auf die Ja-Nein-Struktur unserer Aussagen über die Natur zurückzuführen. Doch wenn die Quantenphysik Ausdruck unseres Denk- und Sprachapparats ist – mit Zeilingers Worten: »eine Konsequenz der Tatsache, dass die Welt der Repräsentant unserer Aussagen ist« –, dann frage ich mich, warum wir ausgerechnet die Quantentheorie so fremdartig, ja unbegreiflich finden.

Vielleicht sollte man, statt wie Bohr, Heisenberg und Zeilinger bei der Analyse des Messproblems vom Bewusstsein des Beobachters zu sprechen, lieber konsequent den Messapparat betrachten, der mit dem Quantensystem wechselwirkt. Dann gelangt man automatisch zu einer Form des Dekohärenzmodells: Die Wechselwirkung zwischen Quantensystem und Messgerät reduziert die Zustandssuperposition zu dem Zustand, der tatsächlich gemessen wird.

Aber letztlich sind solche Nuancen Geschmackssache. Das Buch ist ein aufschlussreiches Lesevergnügen, denn Zeilinger erzählt aus erster Hand von der experimentellen Erforschung der Quantenwelt. Gerade dort, wo er mit dem Erzählen in Schwierigkeiten gerät, macht er zudem auf plastische Weise deutlich, wie fremd die Wirklichkeit ist, die hinter Einsteins Schleier Stück für Stück zum Vorschein kommt.

Michael Springer

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Stephen Budiansky
Wenn ein Löwe sprechen könnte
Die Intelligenz der Tiere
Rowohlt, Reinbek 2003, 351 Seiten, € 19,90

Sind Schimpansen klüger als Hunde und diese klüger als Schafe oder Tauben? Der amerikanische Biologe und Wissenschaftsjournalist Stephen Budiansky hält die Frage für falsch gestellt. Alle Säugetiere und Vögel, behauptet er, sind im Wesentlichen gleich intelligent und lernfähig. Wenn einige Tierarten im Ruf stehen, Geistesakrobaten zu sein, dann weil sie sich leicht dressieren lassen oder weil sie zufällig ein menschenähnliches Verhalten an den Tag legen.

Budiansky nimmt den Anthropomorphismus nach allen Regeln der Kunst auseinander. Was er über die Funktionsweise der tierischen Intelligenz schreibt, gehört zum Scharfsinnigsten und Aufschlussreichsten, was es hierüber gibt.

Aus der Rezension von Frank Ufen

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	24

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

MEDIZIN

Bernard Lown

Die verlorene Kunst des Heilens

Anleitung zum Umdenken

Aus dem Englischen von Helga Drews.
Schattauer, Stuttgart 2002. 300 Seiten, € 29,95

Der Arzt Bernard Lown ist wohl den meisten bekannt durch den Friedensnobelpreis, den er 1985 zusammen mit dem russischen Arzt Jewgenij Chazov für die 1980 gegründete Organisation »International Physicians for the Prevention of Nuclear War« (IPPNW) erhalten hat. Den Medizinern ist Lown vor allem vertraut durch die Einführung der Gleichstrom-Kardioversion im Jahr 1962. Dieser bahnbrechende Erfolg in der Akutbehandlung lebensbedrohlicher Herzrhythmusstörungen war der Startpunkt für die Einführung von Intensivstationen und damit eine weitere Technisierung der Inneren Medizin. Selbstkritisch merkt Lown in seinem Buch an, dass er durch diese Entdeckungen der technikdominierten Medizin und damit der Vernachlässigung des »Heilens« Vorschub geleistet hat.

Heilen beginnt damit, dem Patienten zuzuhören

Was einen guten Arzt ausmacht, ist schwer allgemein zu definieren und noch schwerer zu vermitteln. In diesem Zusammenhang erwähnt Lown immer wieder als großes Vorbild seinen klinischen Lehrer Samuel A. Levine. Das Buch lebt von zahlreichen Berichten über selbst erlebte Arzt-Patient-Begegnungen.

An Beispielen macht er wesentliche Grundregeln deutlich: Der Arzt kann und soll es seinem Patienten erleichtern, sich ihm anzuvertrauen. Dieses Vertrauen kann auch durch die Berührung im Rahmen der körperlichen Untersuchung entstehen, wie dies erfahrene ältere Internisten übereinstimmend berichten. Gegenüber dem Patienten muss der Arzt seine Worte sehr sorgfältig wählen. Leichtfertiger Einsatz invasiver Untersuchungen kann letztlich mehr schaden als nutzen. Diese – nicht neuen – Thesen erhalten hier ein besonderes Gewicht dadurch, dass ein exponierter Vertreter der wissenschaftlich-technischen Medizin sie vorbringt.

Ein ganzer Abschnitt des Buches ist der Würde des Alters und des Sterbens gewidmet. Erschütternd ist sein Bericht über die vergeblichen Reanimationsbemühungen bei seiner sterbenden 95jährigen Mutter, die wegen eines Organisationsfehlers entgegen seinen Anweisungen vorgenommen wurden.

Einige Kapitel behandeln den von ihm mitgestalteten technischen Fortschritt der Medizin in den 1960er und 1970er Jahren. Hier haben die Schilderungen nicht nur autobiografischen Charakter; sie können auch vom Medizinhistoriker mit Gewinn gelesen werden.

Die zentrale These seines Buches aber lautet: »Unser [das amerikanische] Gesundheitssystem droht zusammenzubrechen, wenn der ärztliche Berufsstand sein Augenmerk vom Heilen wegbewegt, das damit beginnt, dem Patienten zuzuhören.« Aus dieser ärztlichen Grundhaltung zieht er auch politische Folgerungen, die nicht nur auf die Gestaltung der Gesundheitspolitik, sondern ausdrücklich auf die Linderung der Armut abzielen.

Neben den medizinischen und politischen Leistungen Bernard Lowns zeugt dieses Buch auch von seiner Zivilcourage. In der McCarthy-Ära weigerte er sich, aus einer Liste von 400 »subversiven« Organisationen diejenigen anzugeben, denen er angehört habe. Stattdessen forderte er die Abschaffung dieser diskriminierenden Gesetze. Das brachte ihm eine einjährige Strafversetzung in ein Krankenhaus nach Washington ein, die er später so kommentierte: »Sie ruinierte mein Leben ein Jahr lang und verzögerte meine Karriere um ein Jahrzehnt, aber sie machte mich zu einem besseren Arzt.«

Dieses Buch ist ein überzeugendes Plädoyer für eine menschliche, ganzheitliche Medizin. Es ist eine in meinen Augen gerechtfertigte Ermutigung an die Schulmedizin, die psychosomatischen Aspekte einer Erkrankung ernst zu nehmen. So ist es sehr zu empfehlen für alle Ärzte, darüber hinaus aber auch für Menschen, die in Krankenhausverwaltungen oder in der Gesundheitspolitik tätig sind. ◁

Malte Meesmann

Der Rezensent leitet die Medizinische Klinik (Schwerpunkt Kardiologie) am Juliusspital in Würzburg.

WELTERBE

Von der Pyramide zum Stahlwerk

Den besten Überblick über die erhaltenswertesten Stätten der Menschheit bietet nicht die verantwortliche Organisation Unesco, sondern – das öffentlich-rechtliche deutsche Fernsehen.

HTTP://WHC.UNESCO.ORG/NWHC/PAGES/SITES/MAIN.HTM

Hier kann man sich in Angkor (Kambodscha) umschauen – nur von einem Punkt aus, aber immerhin.

Von Elke Reinecke

Mit dem Prädikat »Welterbestätte« äußert die Unesco zunächst nur die rechtlich unverbindliche Meinung, es handele sich um ein »Denkmal von herausragender Bedeutung«; denn die Kulturorgansiation der Uno darf nicht in geltendes Recht der einzelnen Länder eingreifen. Immerhin muss das Land, in dem das Denkmal liegt, einen Antrag auf Aufnahme in die Liste des »Weltkulturerbes« beziehungsweise »Weltnaturerbes« stellen und dabei den größtmöglichen Schutz nach der eigenen Gesetzgebung zusagen. So wird erreicht, dass die Aufnahme in die Liste nicht nur den Nationalstolz befriedigt und die Kassen der örtlichen Tourismusbetriebe füllt.

Insgesamt umfasst die Liste bisher 754 Kultur- und Naturdenkmäler auf der ganzen Welt – 27 davon in Deutschland, vom Aachener Dom über die stillgelegte Völklinger Eisenhütte und die Grube Messel bis zu den jüngst aufgenommenen historischen Altstädten von Stralsund und Wismar. Auf der umfangreichen, englisch- und französischsprachigen Website http://whc.unesco.org der Unesco finden Sie nicht nur die aktuelle Liste samt weiterführenden Links, sondern können auch Nachrichten und Berichte über ausgesuchte Denkmalschutz-Aktivitäten lesen.

Unter »virtual tour« finden sich – per Maus erfahrbare – Rundblicke von ausgewählten Standpunkten zum Beispiel in der Pyramide von Gizeh oder einem der Tempel von Angkor (Bild rechts oben): nicht gerade das, was man sich unter einer Führung durch die Stätte vorstellt, aber immerhin. Das Angebot an Touren wird gerade ausgebaut. Der Bereich »Just for kids« ist offensichtlich ganz am Anfang der guten Absichten stecken geblieben: Außer großer, farbiger Schrift und direkter Ansprache gibt es dort nichts, was auf den übrigen Seiten nicht besser zu sehen wäre.

WWW.SCHAETZE-DER-WELT.DE/DENKMAL.PHP?ID=108

Der Aachener Dom wurde 1978 als erste deutsche Stätte in die Liste des Weltkulturerbes aufgenommen.

Die Deutsche Unesco-Kommission e. V. konzentriert sich auf ihrer Website www.unesco.de naturgemäß auf die deutschen Stätten. Alle Texte werden auch in der Druckversion angeboten, das heißt ausdruckfreundlich formatiert und ohne Bilder – in diesem Fall eine übertriebene Bemühung, denn Bilder und ähnliches sind ohnehin nicht zu finden.

Die gibt es auf der Website www.weltkulturerbe-d.de; allerdings sind die Texte recht kurz und seit 2001 nicht mehr aktualisiert worden. Die ebenfalls private Site »UNESCO-Welterbe in Deutschland« (http://home.bawue.de/~wmwerner/welterbe.html) glänzt auch nicht mit vielen Bildern; immerhin hat sich der Autor die Mühe gemacht, zahlreiche lohnende Links bereitzustellen.

Wirklich multimedial und spannend ist die Website »Schätze der Welt – Erbe der Menschheit« zur gleichnamigen Fernsehserie im Südwest-Fernsehen und in 3SAT (www.schaetze-der-welt.de). Sie bietet das gesamte Filmmaterial in einem übersichtlichen Online-Archiv an. Direkt anschauen oder Downloaden – beides ist möglich. Alle »Welterbe«-Denkmäler sind in der Website enthalten, zu finden über die Auswahl nach Kontinenten oder Ländern, alphabetisch sortiert in einer Gesamtliste oder über eine Stichwortsuche. Wer dann das Objekt gefunden hat, wird geradezu verwöhnt: Auf einen kurzen Übersichtstext mit Bild folgen eine Zeittafel mit Daten und Fakten, das Filmmaterial selbst, der Filmtext und eine Liste der Filmmusik noch einmal separat, ausgesuchte Bilder und eine kommentierte Linkliste. Letzter Leckerbissen ist die »interaktive Bildergalerie«: Verschiedene Bilder aus dem Film dienen als Einstiegspunkte für die zugehörige Filmstelle. Auf dieser Site stöbert man lange und gern – und lernt sogar dabei. ◁

WISSEN ZAHLT SICH AUS

Spektrum-Jubiläumspreisrätsel

1978–2003: Seit 25 Jahren erscheint die Zeitschrift Spektrum der Wissenschaft. In dieser Zeit sind reichlich zwei Regalmeter Wissenschaft aus erster Hand zusammengekommen. Die Leser der ersten Stunde haben damit nicht nur ihren Horizont nach allen Seiten erweitert – sie sind auch optimal auf unsere Preisrätsel vorbereitet. (Die anderen haben auch ihre Chance! Es gibt viele Quellen wissenschaftlicher Information.)

Wissen lohnt sich – in unserem dreiteiligen Jubiläumspreisrätsel erhöht es die Chancen auf einen Gewinn.

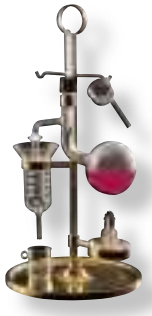
Tragen Sie in die Kästchen rechts unten die Buchstaben ein, die Sie unter der entsprechenden Nummer im Kreuzworträtsel rechts gefunden haben. »39+« meint den rechten Nachbarn des Feldes mit der Nummer 39, »41/« den rechten oberen Nachbarn des Feldes mit der Nummer 41. Das Lösungswort bezeichnet einen Begriff, der in den letzten 25 Jahren immer wieder Thema unserer Zeitschrift war.

Senden Sie uns das Lösungswort mit dem Stichwort »Jubiläumspreisrätsel September« per Post, Fax oder E-Mail an Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Fax 06221-9126751, marketing@spektrum.com.

Einsendeschluss ist der 22. 09. 2003. (Es gilt das Datum des Poststempels.) Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Unter allen Einsendern der richtigen Lösung des September-Rätsels verlosen wir:

▶ **Kairos – eine Uhr von Chronoswiss**
Die Uhr Kairos im Wert von 3100 € besitzt ein formvollendetes, bis 30 Meter Tiefe wasserdichtes Goldstahlgehäuse, das aus 19 Teilen von Hand montiert ist. Sein Saphirglas im Boden ermöglicht den Blick auf ein hochpräzises Automatikwerk mit kugelgelagertem Rotor. Zifferblatt mit Datumsanzeige.



▶ **Zwei Tischdestillen**
Mit der Tischdestille zaubern Sie den Partygag auf den Tisch: Innerhalb von nur wenigen Minuten verwandelt sie Ihren Wein in einen Weinbrand.

▶ **Fünf CDs Encyclopaedia Britannica**
Encyclopaedia Britannica – das Lexikon der Extraklasse in der CD-Rom Deluxe Edition. Mit mehr als 75000 Artikeln, unzähligen Abbildungen, vielen Videos und Hörbeispielen sowie über 220000 Links zu ausgewählten Websites!

▶ **Fünfzig Gyrotwister**
Trainieren Sie ihre Arme und Handgelenke, indem Sie der durch den Rotor des Gyro-Twisters erzeugten Fliehkraft entgegenhalten.

IHR LÖSUNGSWORT:

24	30	48	33	21	11	9	39+	16	43	3	41/	50+	35	19

WICHTIGE INFORMATION

Auch im Oktober und im November wird es ein Preisrätsel geben, in dem jeweils ein Lösungswort gesucht wird. Und das Mitmachen lohnt sich doppelt. Denn neben den drei Monatsziehungen gibt es noch eine Schlussverlosung. Dort haben alle diejenigen die Chance auf einen Zusatzgewinn, die uns die Gesamtlösung schicken. Unter allen Einsendern der richtigen Gesamtlösung verlosen wir:

▶ **Eine Kurzreise nach New York** mit Besuch von Scientific American (Flug und 3 Übernachtungen für 2 Personen)

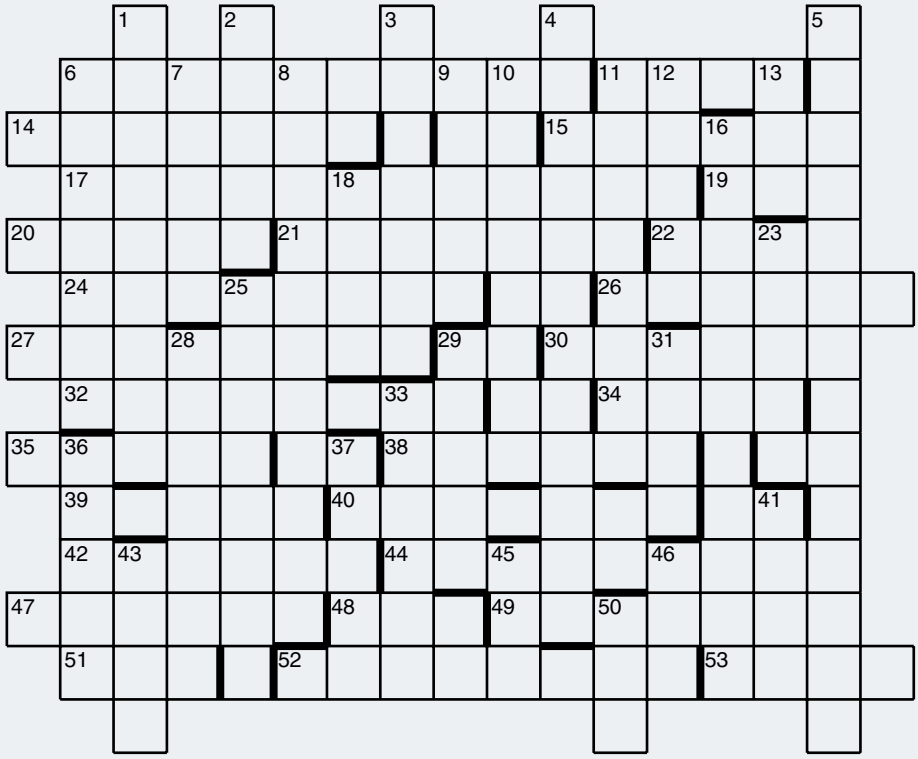
▶ **Eine Encyclopaedia Britannica:**
Der Lexikonklassiker schlechthin: 32 Bände in überarbeiteter Neuauflage mit über 65000 Artikeln, mehr als 24000 Fotos, Karten und Illustrationen. Insgesamt 1,5 Buchmeter geballtes Wissen!

▶ **und fünfzig weitere Zusatzpreise ...**

Bewahren Sie die kompletten Lösungen von September bis November auf, aus ihnen ergibt sich die Gesamtlösung. Die Lösungen der drei Preisrätsel geben wir wir in der Januar-Ausgabe 2004 bekannt. Die Gewinner werden im Januar benachrichtigt.

Wissenschaftlich um die Ecke gedacht

Von Christoph Pöppe



Waagerecht:

6. die molekulare Strickliesel
11. das Garn, aus dem das weltweite Netz geknüpft ist
14. einige Potenzen der Unbekannten, mit Konstanten multipliziert und zusammengezählt
15. er illustrierte Anfang des 16. Jahrhunderts in mehreren Holzschnitten die »artes liberales« (Wissenschaften)
17. sie selbst ist nicht besonders berauschend; aber ihr Diethylamid …!
19. viele Signale teilen sich eine Glasfaser – reihum wird jedem ein Stückchen Zeit zugewiesen (Abkürzung)
20. einer der zwanzig Proteinbausteine (derselbe wie 7 senkrecht)
21. seine Transformation ist ein bequemer Weg zum Chaos
22. empirisch ist nicht zu beweisen, dass es keinen weißen gibt
24. Pfeifkonzert ohne Ausschaltknopf
26. sie heißt meistens d, und $d(x,y) \le d(x,z) + d(z,y)$
27. begrenzt durch ebene Flächen
30. die Wut, die sich die Engländer vom Leibe halten
32. sie argumentierte zusammen mit ihrem Paul gegen die Theorie vom chinesischen Zimmer (Vorname)
34. er schuf ein Gleichgewicht – und geriet für Jahrzehnte aus demselben
35. das, was zwei Flächen von 27 waagerecht gemeinsam haben
38. den isst auch der Vegetarier nicht
39. erforschte das Liebesleben der Viren (Nobelpreis)
40. Manneszier
42. absolut coole Gegend – vor 95 Jahren
44. der Geometer von Einsteins Raumzeit
47. heute heißt es Psyche
48. Zacken des Geistes
49. die kürzeste Verbindung zwischen A und B
51. wenn etwas gegen unendlich strebt (Abkürzung)
52. kommt ein Photon geflogen, ist es eine echte
53. auch er entdeckte Mendels Gesetze aufs Neue (Vorname)

Senkrecht:

1. lange Kette aus dem Chip-Stoff
2. er klärte die Sache mit dem Fett im Blut
3. was Einstein dem erzählte, erzählt Wolke
4. da sind die Kurve und ihre Tangente innig vereint
5. die erste Stufe des Warmblüter-Recyclings
6. Verallgemeinerung von 27 waagerecht auf höhere Dimensionen
7. einer der zwanzig Proteinbausteine (derselbe wie 20 waagerecht)
8. macht dem Seuchenmediziner Arbeit
9. fliegende Schüssel
10. die ganz langsamen Zyklen
11. Friedhelm heißt der Fälscher
12. unter den Reichen des Lebendigen das letzte
13. erhellt Bildschirme und Uhren
16. so gesehen sind wir alle halb männlich
18. dort wird's eng für die Elektronen im Transistor
23. er beschrieb das Leben der 12 senkrecht
25. die sich ringelnden Töchter des Meeresgottes
28. hat in Mendelejews Schema die Nummer 39
29. Schublade für Bits
31. Abu … überlieferte im »liber mensurationum« antikes mathematisches Wissen
33. dieselben Elemente, anders zusammengebaut
36. eins vom Vater, eins von der Mutter
37. ob der Neandertaler unter ihnen war?
41. wenn die Batterien zu teuer werden
43. er und seine »Detektive« machten den Dreckbakterien den Garaus (Vorname)
45. hier röhrt der Hirsch ohne Zuschauer (Abkürzung)
46. stückweis differenzierbare Kurve in der Ebene
50. das Molekül des Lebens, in der Versandform

Lösung zu »Billard« (Juli 2003)

Paul kann die zweite Billardkugel auf eine (fast) beliebige Stelle des Tisches legen – er kann sie stets mit der ersten Kugel treffen und auch noch jede Vorgabe darüber einhalten, wie oft (ein- bis viermal) diese über die Bande gespielt werden soll.

Ähnlich wie im Rätsel vom September 2002 ist es zweckmäßig, den Billardtisch (grün im Bild) nach links und oben durch dessen Spiegelbilder an der jeweiligen Bande zu erweitern. Aus dem Zickzackweg der Kugel wird in dieser Darstellung eine geradlinige Bahn. Die Nummern in den Feldern geben an, wie viele Spiegelachsen die Kugel auf ihrem Weg von der rechten unteren Ecke überschreitet, das heißt, wie viele Banden sie berührt.

Nichts hindert Paul daran, mit der ersten Kugel einen beliebigen Punkt innerhalb des Gesamtbilds anzusteuern; er muss nur den Abstoßwinkel geeignet wählen (und unendlich genau einhalten). Allerdings könnte die zweite Kugel »zu früh« getroffen werden, etwa wenn sie in der linken oberen Ecke des Tisches liegt und genau eine Bandenberührung vorgeschrieben ist. Aber diese Ausnahmepunkte tragen nichts zum Flächeninhalt bei. Die korrekte Antwort auf die Rätselfrage ist also »100 Prozent«.

Die Gewinner der fünf Würfelsets »Baumbestimmungswürfel« sind Carsten Siemens, Wentorf; Joachim Estel, Spalt; Anna Doppler, Kirchdorf (Österreich); Hartmut Riman, Augsburg und Volker Teuchert, Weimar (Lahn).

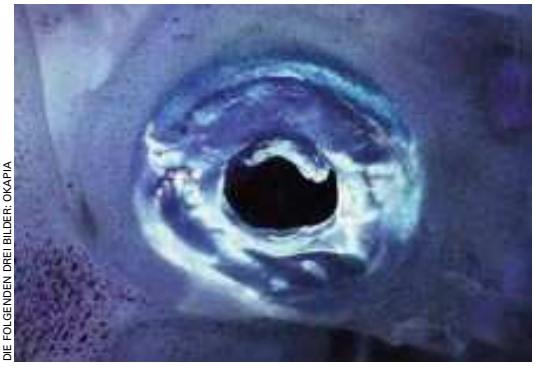
4	3	2
3	2	1
2	1	

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

SIMULATION

Die Evolution der Computerwürmer

Primitive, höchst abstrakte Nachbildungen lebender Organismen zeigen im Laufe der Generationen überraschende Veränderungen durch Mutation und Selektion.



DIE FOLGENDEN DREI BILDER: OKAPIA

Von Christoph Pöppe

Eine komplexe Struktur wie das Auge des Wirbeltiers ist eine harte Herausforderung für die Evolutionsheorie. Wer sehen kann, hat zwar offensichtlich einen enormen Selektionsvorteil gegenüber seinen blinden Konkurrenten; aber wie soll ein Auge entstehen, wenn es zuvor noch keines gab? Durch eine Folge von Mutationen, die jede für sich nur eine kleine Änderung bewirken, sagt die Theorie. Aber jede Zwischenstufe auf dem langen Weg zum Auge muss für sich schon vorteilhaft sein, sonst wäre sie längst ausgestorben, bevor die nächste Mutation eintreten konnte. Es fällt schwer, sich solche vorteilhaften Zwischenstufen vorzustellen. In diese Erklärungslücke stoßen die Kreationisten mit ihrer These, anstelle des blinden Zufalls der Mutation müsse ein »intelligenter Designer« gewaltet haben – also ein gezielter göttlicher Eingriff in den natürlichen Lauf der Dinge.

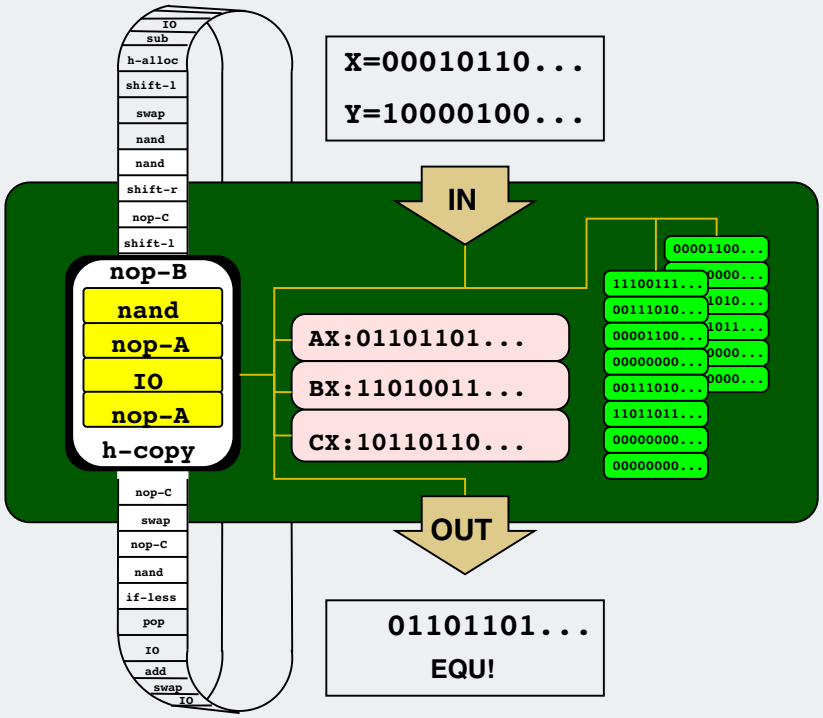
Andererseits haben die verschiedensten Tiergruppen unabhängig voneinander Augen »erfunden«. Sehenkönnen ist offenbar so ungeheuer vorteilhaft, dass die blinde Evolution früher oder später einfach »darauf kommen musste«. Insbesondere gibt es viele denkbare evolutionäre Wege zum Sehen. Jeder von ihnen ist vielleicht eine höchst unwahrscheinliche Anhäufung von Zufällen. Aber dass die Natur von den vielen denkbaren Wegen wenigstens einen findet, ist nicht mehr ganz so unwahrscheinlich.

Leider kann das klassische Werkzeug der Wissenschaft, das Experiment, zur Klärung solcher Fragen nicht viel beitragen. Einige zehntausend Generationen dauert es schon, bis das komplizierte Wechselspiel von Mutation und Selektion deutliche Wirkungen zeigt, und so lange kann ein Wissenschaftler kaum warten. Immerhin hat der Mikrobiologe Richard E. Lenski von der Universität von Michigan in East Lansing in einem Fall gezeigt, dass es verschiedene Wege zum gleichen Ziel gibt: Er füllte 1988 zwölf genetisch identische Populationen des Darmbakteriums *Escherichia coli* in Flaschen ab und setzte sie identischen Bedingungen aus. Bereits elf Jahre – oder 24 000 Generationen – später konnte er durch plötzliche Änderung der Bedingungen feststellen, dass die zwölf »Völker« zwar sämtlich die Herausforderungen ihrer jeweiligen Umwelt bewältigt hatten, aber auf sehr unterschiedliche Weise.

Während selbst schnelllebige Bakterien noch Jahre geduldiger Hege erfordern, sind künstliche »Lebewesen«, die nur als Software im Computer existieren, erheblich pflegeleichter, und ihre Generationenfolge ist noch weit rascher. Ihre Programmierer haben alles überflüssige Beiwerk weggelassen; deshalb sind die Tierchen auch nicht so farbenfroh wie die Monster aus den Computerspielen oder so kuschelig wie die »Creatures« (Spektrum der Wissenschaft 10/1996, S. 14), die immerhin zu einer gewissen Evolution fähig sind. Es erfordert schon hohes Abstraktionsvermögen, in ihnen

Das Innenleben eines Computerwurms

In der künstlichen Welt »Avida« ist das Genom eines Computerwurms ein schleifenförmiges Computerprogramm. Der Wurm selbst ist ein auf das Einfachste reduzierter Computer, der dieses Programm ausführt. Dazu verfügt er über die Register AX, BX und CX, einen Arbeitsspeicher (hellgrüne Kästchen) und eine Möglichkeit zur Datenein- und -ausgabe. Die eingelesenen Daten X und Y hat er soeben zum Output EQU(X,Y) verrechnet: Im Ergebnis steht genau dort eine Eins, wo die beiden Bits aus X und Y gleich sind.



RICHARD E. LENSKI / NATURE

ELKE REINECKE

Im Verlauf der Evolution ist das Auge mehrfach »erfunden« worden. Von links nach rechts: Tintenfisch, Fliege und Wirbeltier (Bussard und Mensch).

überhaupt Eigenschaften echter lebender Organismen wiederzufinden.

Ein »Lebewesen« in der virtuellen Welt ist nichts weiter als ein Stück Computerprogramm, eine Folge elementarer Maschinenbefehle; nennen wir es einen »Wurm« (Bild links unten). Die ersten ihrer Art gediehen 1990 in der Software-Welt »Tierra« von Thomas Ray und erregten erhebliches Aufsehen. Ein Nachfolger von »Tierra« ist »Avida«, geschrieben von Christoph Adami vom California Institute of Technology in Pasadena, der seit 1998 mit Lenski zusammenarbeitet. Mit zur Arbeitsgruppe gehören Charles Ofria aus der Informatik und Robert T. Pennock aus der philosophischen Fakultät der Universität von Michigan, der mehrere Bücher gegen den Kreationismus verfasst hat.

Der Unterschied zwischen Genotyp und Phänotyp, für Biologen von zentraler Bedeutung, ist bei den Würmern aus »Avida« kaum zu erkennen. Der Genotyp ist eine Kette von »Genen«, deren jedes ein elementarer Maschinenbefehl ist, und der Phänotyp ist ein – durch die Software von »Avida« simulierter – Primitivcomputer, der diese Befehle der Reihe nach ausführt; er enthält nur ein paar Speicherplätze, Register und Instruktionszähler. Man darf an das Ablesen eines DNA-Strangs denken, eines ringförmigen übrigens, denn nach dem letzten Befehl kommt wieder der erste an die Reihe; aber sehr viel weiter geht die Analogie nicht.

Die Kunstwürmer können sich vermehren: Unter den 26 Instruktionen, die der Primitivcomputer versteht, ist auch eine, die das eigene Erbgut Stück für Stück an eine benachbarte Stelle der »Avida«-Welt kopiert. Die Kopie beginnt dann ihrerseits zu leben, das heißt, sich selbst als Programm auszuführen. Und natürlich gibt es die Kopierfehler, die den Biologen als Punktmutationen geläufig sind: Mit einer geringen Wahrscheinlichkeit wird zufallsabhängig ein zu kopierendes Gen durch ein anderes ersetzt, weggelassen oder um ein weiteres verlängert. Die Länge des Genoms variiert also im Laufe der Generationen, wie im echten Leben.

Auch virtuelle Würmer können – und müssen – fressen: Die Ausführung eines Programms verbraucht pro Instruktion eine gewisse Menge gedachter Energie; jeder Wurm bekommt bei seiner Geburt einen ersten Energievorrat mit. Aber während Lenski seinen Bakterien täglich etwas Glucose in die Flasche füllt und es ihnen überlässt, um die begrenzten Vorräte zu konkurrieren, kriegen die künstlichen Tierchen – von der Erstausstattung abgesehen – ihren Zucker nur für besondere Leistungen, wie im Zirkus.

Leben und Fortpflanzung der Computerwürmer

Welche Leistungen kann man von einem primitiven Computerprogramm verlangen? Rechnen! Die Schöpfer von Avida sehen es noch etwas fundamentaler und fordern nur, dass ihre Kreaturen logische Verknüpfungen richtig ausführen. Wenn ein Wurm zwei vorgegebene Bitketten einliest und eine weitere Bitkette ausgibt, die genau dort eine Eins hat, wo beide eingelesenen Ketten eine Eins hatten, dann hat er die logische Verknüpfung UND richtig ausgeführt und wird mit vier Stück Zucker, das heißt Einheiten virtueller Energie, belohnt; davon kann er wieder eine ganze Weile leben.

Im Prinzip ist er zu solchen Leistungen fähig, denn unter den 26 elementaren Instruktionen ist auch die logische Verknüpfung NAND (»NOT-AND«): Sie gibt eine Null aus, wenn beide Eingänge gleich 1 sind, sonst eine Eins. Jede überhaupt denkbare logische Verknüpfung zweier Eingänge lässt sich aus Anwendungen der Funktion NAND zusammensetzen. Allerdings sind manche Verknüpfungen schwieriger als andere, indem sie mehr Anwendungen von NAND erfordern. Die schwierigste unter ihnen heißt EQU wie *equality* (Gleichheit): Sie gibt genau dann eine Eins aus, wenn die beiden Eingangsgrößen gleich sind. Ein Wurm, der erfolgreich die Funktion EQU anwendet und das Ergebnis ausgibt, bekommt volle 32 Stück Zucker, während der Lohn für andere logische Funktionen eine Zweierpotenz zwischen 2 und 16 ist.

Damit ist die Fähigkeit, EQU zu berechnen, vergleichbar der Fähigkeit zu sehen: Sie bringt einen so großen Selektionsvorteil, dass sie sich alsbald in der ganzen Population durchsetzt, sowie auch nur ein Wurm sie erstmalig erwirbt. Die metabolische Aktivität der Würmer, sprich die Geschwindigkeit, mit der ihr Programm einschließlich der Fortpflanzung abläuft, hängt nämlich von ihrem Energievorrat ab. Jeder lebt auf einem Platz in einem – gedachten – Gitter aus 60 × 60 Plätzen. Ein neugeborenes Kind siedelt sich auf einem der Plätze unmittelbar neben der Mutter an und bringt dabei den bisherigen Inhaber dieses Platzes um. Es kommt also entscheidend darauf an, sich schneller zu vermehren als der Nachbar. Die Interaktion der Würmer beschränkt sich allerdings auf diese Art der Verdrängung; einen richtigen »Krieg der Kerne« mit Beschädigung des Gegners (Spektrum der Wissenschaft 1/1993, S. 10) gibt es nicht.

Andererseits ist EQU, ebenso wie Sehen, eine komplexe Fähigkeit: Sie erfordert eine große Anzahl von Mutationen, deren keine für sich allein besonders vorteilhaft ist. Die anderen Leistungen, für die es mittelgroße Mengen an Zucker ▷

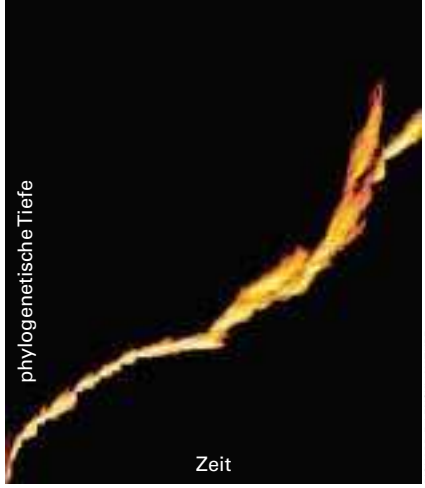
▷ gibt, sind EQU nicht besonders ähnlich. Man muss für EQU sogar Dinge tun, die für die anderen Funktionen eher nachteilig sind.

So jedenfalls sieht es nach dem Ergebnis der Experimente aus. Lenski, Adami und ihre Kollegen setzten in ihre Kunstwelt 3600 Urwürmer mit einem Genom der Länge 50, die zwar zur Vermehrung fähig sind, aber ansonsten zu nichts, was Zucker bringt. Die Mutationsrate ist dem natürlichen Vorbild nachempfunden: Durchschnittlich jede vierhundertste Instruktion wird beim Kopieren verfälscht, darüber hinaus wird mit einer Wahrscheinlichkeit von zwei Prozent eine Instruktion aus einem Genom gelöscht oder darin eingefügt. Da diese Mutationen vom Zufall bestimmt sind, geschieht dasselbe wie mit Lenskis zwölf Bakterienstämmen: Bei gleichen Ausgangsbedingungen und gleicher Umwelt verläuft die Entwicklung jedesmal anders. Anders als in der echten Natur kann man in der künstlichen Welt mehrere Evolutionswege durchspielen – und vor allem muss man sie nicht mühsam aus Fossilien rekonstruieren. Die ganze »Phylogenese« ist vollständig dokumentiert und mit bloßen Auge oder geeigneten Suchprogrammen erforschbar.

Evolution im Reagenzglas: der Avida-Computer

Die Forscher ließen ihre Modellwelt fünzigmal ablaufen, und zwar über eine Zeit, die ungefähr 16 000 Generationen eines Urwurms entspricht. (Da längere Genome auch längere Zeit zur Fortpflanzung brauchen, hängt die Generationsdauer von der Größe des Tierchens ab.) In immerhin 23 von diesen 50 Fällen entwickelten sich EQU-fähige Würmer, und zwar jedesmal andere; ihre Genomlänge – die Anzahl ihrer Programmbefehle – variierte von 49 bis 356. Zumindest für diese spezielle Fähigkeit gibt es also sehr viele verschiedene Evolutionswege. Nachdem in einer Population erstmals die EQU-Fähigkeit aufgetreten war, ging sie nicht wieder verloren, auch wenn die EQU-fähigen Würmer weiter evolvierten und sich gelegentlich noch zusätzliche Fähigkeiten zulegten.

Einen der »Pionier-Würmer«, die erstmals die EQU-Fähigkeit zeigten, haben die Forscher eingehend untersucht. Dadurch konnten sie unter anderem bestätigen, dass die so reich belohnte Fähigkeit tatsächlich komplex ist in dem Sinne, dass sie das Zusammenwirken zahlreicher Gene erfordert. Sie änderten systematisch jede einzelne der 60 Instruktionen ab, aus denen sein Genom bestand; daraufhin ging in 35 Fällen die EQU-Fähigkeit verloren. Bei den entsprechenden Würmern aus den anderen Progammläufen variierte die Anzahl der in diesem Sinne unerlässlichen Gene von 17 bis 43.



RICHARD E. LENSKI / NATURE

Der evolutionäre Weg zur Höchstleistung. Das Bild zeigt die Gesamtanzahl der Mutationen gegenüber dem Urwurm, aufgetragen gegen die Zeit. Farben kennzeichnen die Häufigkeit (ansteigend von rot nach gelb) der Würmer mit der entsprechenden Mutationsanzahl. Die dünne blaue Linie kennzeichnet die Abstammungslinie des Wurms, dessen Nachkommen wegen ihrer EQU-Fähigkeit schließlich die Population dominierten.

Muss es auf dem Weg zu der komplexen Fähigkeit Zwischenstufen geben, die ihrerseits vorteilhaft sind? Unterbleibt also die Entwicklung dieser Fähigkeit, wenn die Zwischenstufen keinen Vorteil einbringen? Die Forscher ließen die Welt abermals ablaufen, gaben aber diesmal für eine oder zwei der »niederen« Leistungen keinen Zucker. Einerlei welche das waren, die Fähigkeit, die ganz große Zuckerportion abzugreifen, entwickelte sich kaum seltener als bei der großzügigen Umwelt. Erst als den Würmern sämtliche kleinen Belohnungen vorenthalten wurden, brachte es keiner von ihnen mehr zu Höchstleistungen. Vielmehr wurden sie im Laufe der Zeit kürzer: Es gab eben nichts, wofür es sich gelohnt hätte, ein längeres Genom mit dem Nachteil verzögerter Fortpflanzung zu kultivieren. Auf einem kurzen Genom aber findet beim besten Willen keine EQU-Fähigkeit Platz.

Die Frage nach den Zwischenstufen hat also, zumindest für dieses Modellsystem, eine unerwartet komplizierte Antwort gefunden: Die Zwischenstufen selbst sind eigentlich nicht erforderlich. Aber die Umwelt muss die Entwicklung langer Genome begünstigen und vor allem ausreichend Zucker geben, um auch einige Exoten durchfüttern zu können.

Denn das ist ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen: Der Weg zum Gipfel geht meistens durch ein Tal der Tränen. Die letzte, entscheidende Mutation, die dem Wurm die EQU-Fähigkeit brachte, hat in den meisten Fällen zugleich eine andere Fähigkeit zerstört, sodass sie eigentlich als schädlich einzuordnen wäre. Mehr noch: Die vorletzte Mutation beeinträchtigte ihren Träger häufig so stark, dass seine Nachkommenlinie bald ausgestorben wäre, wäre nicht wenig später die rettende letzte Mutation gekommen.

Noch kann man gegen das ganze Experiment der amerikanischen Informatiker die üblichen Einwände erheben: Es ist unklar, ob die Ergebnisse etwas über das echte Leben aussagen oder nur ein Artefakt der radikalen Vereinfachung sind. Vielleicht bildet das Computermodell eine zentrale Eigenschaft der echten Evolution nicht richtig ab, und wenn es nachgebessert wird, ist auf einmal alles ganz anders.

Aber schon jetzt eignet sich die Welt Avida, Theorien über die Evolution zu überprüfen – vorausgesetzt, die Theorie ist so allgemein, dass auch diese künstliche Welt darunter fällt. Jedermann ist eingeladen, eine Kopie von Avida aus dem Internet zu laden und damit seine eigene Welt zu betreiben. Mit weiteren überraschenden Ergebnissen ist zu rechnen.

Das Schönste fehlt ohnehin noch: Sex. Es ist gar nicht auszudenken, was alles passieren kann, wenn die Genome zweier Eltern, durch Zufall zusammengebracht, zusammenwirken. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

The Evolutionary Origin of Complex Features. Von Richard E. Lenski, Charles Ofria, Robert T. Pennock und Christoph Adami in: Nature, Bd. 423, S. 139, 8. Mai 2003.

Test Tube Evolution Catches Time in a Bottle. Von Tim Appenzeller in: Science, Bd. 284, S. 2108, 25. Juni 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

KAZUHIKO SANO

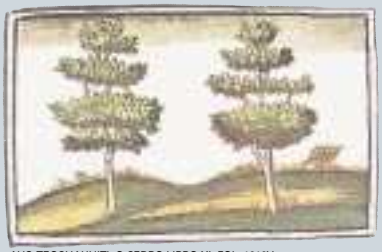
Die Evolution der Vogelfeder

Lange bevor die Vögel entstanden, trugen schon räuberische zweibeinige Dinosaurier Federn. Sie gebrauchten die komplizierten Hautgebilde allerdings nicht zum Fliegen.

WEITERE THEMEN IM OKTOBER

Die Gärten der Azteken

Lustwandeln in weitläufigen Gärten war keine Erfindung europäischer Fürsten. Schon die Azteken liebten Pflanzen so sehr, dass sie ihnen eigene Zeremonien widmeten.



AUS: TEOCUAHUITL O CEDRO LIBRO XI, FOL. 1212V

Dünne Schichten für die Elektronik

Damit Computer immer schneller rechnen und immer mehr Daten speichern, müssen Chips und Magnetspeicher nicht nur in der Fläche, sondern auch in der Höhe schrumpfen.

DON DIXON

Die Suche nach Dunkler Materie

Nach Überzeugung der Kosmologen ist das All von gewaltigen Mengen unsichtbarer Teilchen erfüllt, die sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar machen. Teilchenphysiker weltweit versuchen nun, das Wesen der exotischen Partikel zu enträtseln.

TINA WEST

Ein Gläschen in allen Ehren

So gesundheitsschädlich Alkohol in fast jeder Hinsicht ist: Das tägliche Gläschen Wein oder Bier kann viele vor den heutzutage weit verbreiteten Herz- und Gefäßerkrankungen schützen.